



Journées Sources d'Ions

R. Leroy

► To cite this version:

| R. Leroy. Journées Sources d'Ions. 1999, pp.1-90. in2p3-00987093

HAL Id: in2p3-00987093

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00987093>

Submitted on 5 May 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Gestion INIS
Doc. Enreg. le ...*24/8/99*...
N° TRN

GRAND ACCELERATEUR NATIONAL D'IONS LOURDS

GANIL



FR9903398

JOURNEES SOURCES D'IONS

18 et 19 mars 1999

R. LEROY

GANIL R 99 04

Laboratoire commun CEA / DSM - CNRS / IN²P³

2

30 - 45

C'est avec un grand plaisir que nous avons organisé ces dernières journées sources d'ions. Le nombre toujours croissant de participants et de laboratoires présents lors de ces rencontres dénotent l'utilité et l'intérêt de ces réunions qui permettent un échange important d'informations sur les activités générées dans ce domaine.

Un site internet sera très prochainement créé sous la responsabilité de Thierry Lamy de l'Institut des Sciences Nucléaires de Grenoble, dont le but est d'élargir les possibilités de communication entre les différents acteurs concernés par cette science. Un soutien important sera à fournir de la part de chacun d'entre nous pour que cette opération fonctionne.

La prochaine rencontre sera organisée en l'an 2000 au Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache sous la responsabilité de Ron Hemsworth à une date qui sera communiquée ultérieurement. La décision d'avancer d'une année ces rencontres est justifiée par le risque de télescopage entre cette réunion et la conférence internationale sur les source d'ions (ICIS) qui se tient, comme les journées sources d'ions tous les deux ans.

Nous espérons que nous serons encore plus nombreux à nous retrouver l'année prochaine à Cadarache afin de pouvoir mesurer à nouveau les progrès effectués dans ce domaine.

Renan LEROY

09h00-09h30	Accueil	
09h30-10h00	Discours de bienvenue	J.P. FOUAN, R. LEROY (GANIL - Caen)
Président de séance : Martha BACAL		
10h00-10h30	Les sources de faisceaux primaires à GANIL	P. LEHERISSIER (GANIL - Caen)
10h30-11h00	Utilisation de la source « SUPERSHYPIE » pour deux études de collisions ion- atome et ion-molécule à basse énergie	D. LECLER (CIRIL-ISMRA - Caen)
11h00-11h30	Pause Café	
Président de séance : Gérard MELIN		
11h30-12h00	Production d'ions radioactifs à SPIRAL	F. LANDRE (GANIL - Caen)
12h00-12h30	Les nouvelles sources du GANIL	P. JARDIN (GANIL - Caen)
12h30-13h00	Expérience $1+ \rightarrow n+$	T. LAMY (ISN-SSI) - Grenoble)
13h15-14h15	Repas	
Président de séance : Jean AUBERT		
14h30-15h00	Projet de source d'ions sélective en ligne pour produits de fission	R. MEUNIER (CSNSM - Orsay)
15h00-15h30	Source microonde multiantenne pour le traitement des matériaux	P. COSTE (IEF - Orsay)
15h30-16h00	Développements et applications de sources ECR	C. BIETH (PANTECHNIK - Caen)
16h00-16h30	Pause café	
Président de séance : Raphaël GOBIN		
16h30-17h00	Etat des recherches sur les sources d'ions négatifs sur le faisceau au niveau mondial	C. JACQUOT (DRFC-SCCP -CE Cadarache)
17h00-17h30	Effet de l'adjonction de césium et de xénon dans les sources d'ions négatifs d'hydrogène	M. BACAL (Ecole Polytechnique - Palaiseau)

Président de séance : Claude JACQUOT		
09h00-09h30	Les derniers résultats expérimentaux sur les propulseurs à effet Hall	Y. DANTAL
09h30-10h00	Production d'ions polyatomiques	S. DELLA NEGRA (IPN - Orsay)
10h00-10h30	Expérience et perspectives d'une source supraconductrice	D. HITZ (DRFMC-SI2A - Grenoble)
10h30-11h00	Pause café	
Président de séance : Thierry LAMY		
11h00-11h30	Transport des particules chargées dans une source ECR, expériences, théorie	G. MELIN (DRFMC-SI2A - Grenoble)
11h30-12h00	Interface plasma-faisceau dans les sources d'ions : résultats de simulations numériques	J.L. LEMAIRE (DIF-DPTA - Bruyères Le Chatel)
12h00-12h30	Amélioration de l'émittance du faisceau extrait de la source SILHI	R. GOBIN (CE - Saclay)
12h30-13h00	Discussion et organisation des prochaines journées sources d'ions	R. GOBIN (CE - Saclay)
13h15-14h15	Repas	
14h30-17h00	Visite des installations	



Les sources de faisceaux primaires à GANIL

P. Lehérisier, C. Barué, M. Dupuis, J.L. Flambard, F. Lemagnen, J.P. Rataud
GANIL BP 5027 - 14076 Cedex 5 - France

Pour satisfaire aux possibilités de l'accélérateur, les sources ECR de GANIL sont en mesure de proposer une large gamme de faisceaux d'ions (depuis le carbone jusqu'à l'uranium) qui peuvent être distribués en temps partagé dans 2 salles d'expériences différentes avec des énergies comprises entre 95 MeV/A ET 24 MeV/A.

La mise en œuvre de ces faisceaux nombreux (25 à 30 par an) et variés (31 éléments accélérés) est facilitée par l'utilisation en alternance de 2 sources ECR, chacune couplée à un cyclotron compact appelé cyclotron injecteur.

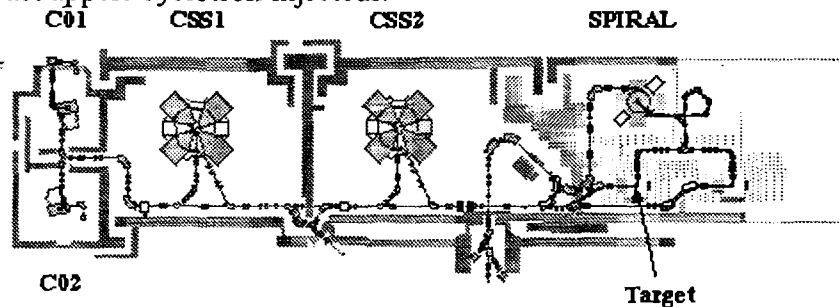


Figure 1

Les sources utilisées sont identiques : ECR4-14 GHz à injection HF coaxiale et dont le confinement magnétique est assuré par 2 bobines dans le plan axial et par un hexapôle à aimant permanent dans le plan radial.

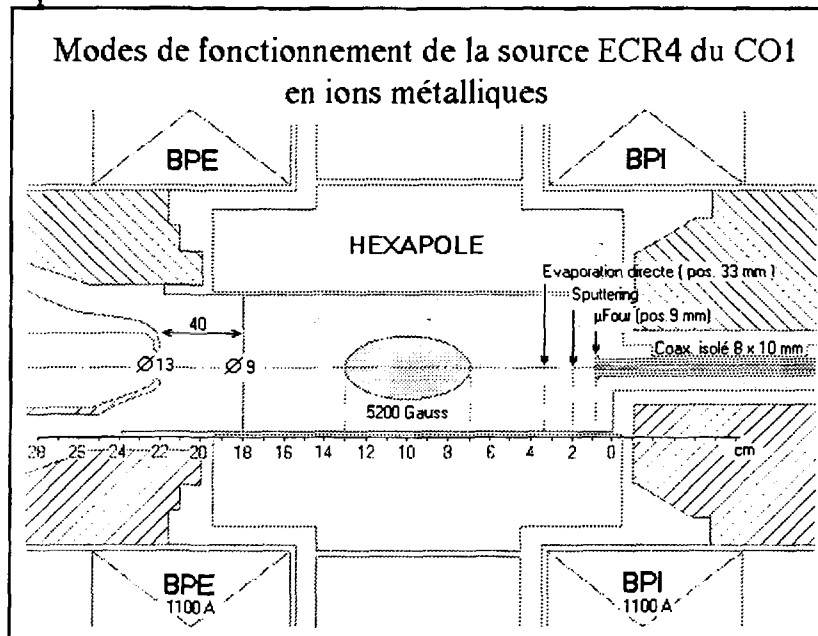


Figure 2

L'une permet l'extraction du faisceau entre 10 et 25 kV avec un rendement à la sortie du cyclotron injecteur C02 de l'ordre de 20%. Tandis que l'autre, placée sur une plate-forme haute

tension avec tous ses équipements annexes, accélère les ions entre 50 et 90 kV et permet d'atteindre un rendement de 45 à 50% à la sortie de l'injecteur C01.

L'utilisation de cette plate-forme permettra de délivrer dès cette année les intensités nécessaires à la production de faisceaux d'ions radioactifs [1].

ION	Compound	Isotop	Aux. Gas	Method	T °C	Consumption mgh	Extraction Voltage kV	Source Ion Current mA
²⁴ Mg ⁺	Mg	79	He+O2	oven	425°	0.1 à 0.3	19	8
²⁸ Si ⁺	SiH4	92	3He	gas			19	30
³² S ⁺	SF6	99		gas			75	30
³² S ⁺	SO2	99		gas			75	75
³⁶ S ⁺	SF6	65		gas			72	14
⁴⁰ Ca ⁺	Ca	97	He	oven	600°	2 à 5	25	10 à 14
⁴⁰ Ca ⁺	Ca	97	He	oven	600°	0.3	25	5 à 6
⁴⁰ Ca ⁺	CaO+Al	65	He	oven	1100°	0.16	18	5
⁴⁴ Ca ⁺	Cr	93	20Ne(O2)	oven	1380°	0.2	44	2.6
⁴⁴ Ca ⁺	Cr	93	20Ne(O2)	oven	1380°	0.230.5	80	3 à 4
⁵⁴ Fe ⁺	Fe(C5H5)2	92	He	gas			19	25
⁵⁸ Ni ⁺	NiO	68	O2	oven	1550°	1.	21	3.5
⁵⁸ Ni ⁺	Ni	68	Nc	sputtering		4.	80	1.2
⁵⁸ Ni ⁺	NiO	99	O2	oven	1550°	0.5 à 1.3	82	1 à 3
⁶⁶ Zn ⁺	Zn	49	O2	oven	340°	0.4	21	5
⁶⁶ Zn ⁺	Zn	34	O2	oven	340°	0.5	80	3 à 4
⁶⁴ Cu ⁺	Cu	99	O2	oven	1240°	0.3 à 1.2	84	2 à 3
⁷⁴ Ge ⁺	GeO2	60	Nc	oven	500°	0.7	19	3.8
⁹² Mo ⁺	MnO3	98	O2	oven	990°	0.7 à 1.7	21	2 à 3
⁹⁶ Mo ⁺	MnO3	97	O2 (He)	oven	590°	1	54	1 à 2
⁹³ Nb ⁺	Nb	100	Nc	sputtering		3.1	60	1.3
⁹³ Nb ⁺	Nb	100	Ar	rod insert	2700°	4	11	4 à 6
⁹³ Nb ⁺	Nb	100	Nc	rod insert	2700°	1.3	81	2
¹⁰⁶ Cd ⁺	CaO	80	22Ne	oven	770°	0.4 à 0.8	20	3 à 5
¹⁰⁷ Ag ⁺	Ag	99	O2	oven	1020°	0.12	18	3 à 4
¹¹² Sn ⁺	Sn	98	O2	oven	1200°	0.2 à 0.7	84	2 à 4
¹¹⁶ Sn ⁺	SnO2	96	O2(+He)	oven	570°	0.6 à 1.7	12	2 à 4
¹²⁵ Te ⁺	Te	95	O2	oven	365°	0.3	51	1
¹²⁵ Te ⁺	Te	95	O2	oven	365°	0.5 à 1.4	16	2 à 5
¹⁵⁴ Sm ⁺	Sm2O3	98	20 Ne	rod insert	1950°	2	68	3
¹⁵⁵ Gd ⁺	Gd2O3			rod insert	2050°	2	17	3.5
¹⁸¹ Ta ⁺	Ta	100	O2	rod insert	3000°		75	2 à 3
¹⁸¹ Ta ⁺	Ta	100	O2	rod insert	3000°		82	2 à 3
¹⁸¹ Ta ⁺	Ta	100	O2 + Ar	sputtering		3.4	19	6 à 9
²⁰⁸ Pb ⁺	Pb	99	O2	oven	720°	0.3	17	5
²⁰⁸ Pb ⁺	Pb	99	O2	oven	720°	2 à 5	65	3
²³⁸ U ⁺	U	99	Nc	sputtering		7.5	66	1.8
²³⁸ U ⁺	U	99	Nc	sputtering		7.5	81	0.9
Exemples de faisceaux d'ions condensables produits par ECR4								
avec un maximum de stabilité et un minimum de consommation								

Tableau 1

Les états de charge couramment produits à la source se situent dans un rapport M/Q de 4 à 10. Les intensités obtenues avec les éléments gazeux (50 à 300 μ A) sont largement supérieures à celles nécessaires (10 à 30 μ A) au fonctionnement actuel (puissance du faisceau en fin d'accélération limitée à 400 W). Ce n'est pas le cas pour la plupart des ions condensables, souvent délivrés à partir d'isotopes enrichis, et dont il faut en outre minimiser la consommation.

C'est pourquoi nous avons été amenés à diversifier nos méthodes de production et à retenir celles les mieux adaptées à nos objectifs.

Evaporation directe :

L'échantillon se présente sous la forme d'une tige de \varnothing 1 à 3 mm, avancée régulièrement sur l'axe de la source pour compenser l'évaporation qui se produit au point de rencontre avec le front chaud du plasma. De moins en moins utilisée en raison de son manque de stabilité et de reproductibilité, de sa consommation élevée (1 à 5 mg/h) et de son adaptation difficile aux isotopes enrichis.

Evaporation par micro four

Constitué d'un tube évaporateur (\varnothing 1,5 mm, capacité 70 à 200 mg) en alumine entouré d'un filament chauffant en W, d'un tube isolant en alumine puis d'un réflecteur Ta, ce micro four a permis la production de la plupart des ions condensables en raison de :

- sa faible consommation 0,1 à 1,5 mg/h
- la possibilité d'y introduire des éléments de toute nature (poudre, oxydes, ...)
- la possibilité de fonctionner au delà du point de fusion des éléments.

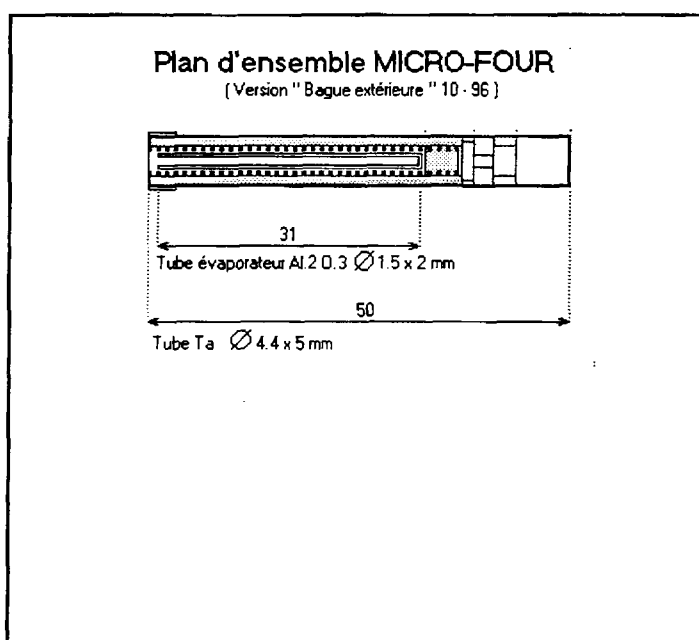


Figure 3

Introduit sur l'axe de la source, le micro four reste à l'intérieur du tube coaxial, afin de découpler au maximum l'évaporation par chauffage ohmique du fonctionnement de la source.

Il permet de travailler à partir de 350° (Zn) jusqu'à 1500° (Ni). Au delà, la rupture du filament ou une métallisation des isolants intervient à plus ou moins long terme.

L'origine chimique et la granulométrie des échantillons peuvent aussi influencer l'évaporation et par conséquent la reproductibilité. Des comportements différents ont été constatés lors de la production de faisceaux à partir soit de l'élément naturel, soit de l'isotope enrichi.

Sputtering

Développé pour la production de faisceaux d'uranium, dont la température de fonctionnement (2000° C) n'est pas accessible par le micro four, cette méthode a été appliquée à quelques autres ions (Nb, Ni, Ta) en raison de sa remarquable stabilité et de sa grande autonomie (4 à 8 jours) malgré une forte consommation (3 à 7 mg/h).

Applicable aux éléments naturels et conducteurs, les échantillons de forme cylindrique (\varnothing : 5 mm, longueur : 20 mm) sont introduits sur l'axe de la source à l'aide d'une tige support refroidie. Ils sont polarisés négativement (800 à 2000 V) par rapport à la chambre à plasma. Les ions du plasma, essentiellement dus au gaz support, servent de projectiles pour arracher les atomes de l'échantillon qui seront à leur tour ionisés. La position, intermédiaire entre l'évaporation directe et celle du micro four et la tension de polarisation permettent d'ajuster la quantité d'atomes éjectés. La position est ajustée (1 fois par jour) pour compenser l'usure de l'échantillon.

Le gaz support permet d'une part l'évaporation de l'échantillon, et d'autre part l'optimisation de la charge désirée. Les fortes consommations observées, limitent l'utilisation de gaz sensibles à l'effet Getter. Un compromis est souvent nécessaire dans le choix de ce gaz.

Avec le Ta l'utilisation de 2 gaz support (Ar, O₂) nous a permis d'obtenir des intensités sensiblement supérieures (Ta²⁴⁺ à 9 μ A) à celles obtenues pour le Ni et le Nb avec un seul gaz support (1 à 2 μ A), tout en conservant une grande stabilité. Dans ce cas, l'argon sert principalement à l'arrachement des atomes tandis que l'oxygène participe davantage à l'ionisation.

Une autre possibilité de contrôler l'arrachement des atomes et d'éviter les phénomènes d'emballement, consiste à limiter le courant (1 à 2 mA) pouvant être délivré par l'alimentation de polarisation de l'échantillon.

Composés condensables volatiles

- A priori c'est la méthode la plus simple à mettre en œuvre, et les intensités obtenues sont plus élevées que celles obtenues par les autres méthodes. Cependant les difficultés sont de plusieurs ordres :
 - trouver un composé d'élément condensable gazeux ou volatil, dont la molécule ne soit pas trop complexe afin de pouvoir optimiser l'ionisation ;
 - pouvoir éventuellement le synthétiser à partir d'isotopes enrichis ;
 - résoudre les problèmes de conductance de ces grosses molécules pour les acheminer sans dissociation ou condensation vers la chambre à plasma ;
 - tenir compte de la toxicité éventuelle du nombre de ces composés.

- Nous utilisons depuis plusieurs années le silane (SiH_4) et l'hexafluorure de soufre (SF_6) pour la production de $^{28}\text{Si}^{6+}$: 30 μA et de $^{36}\text{S}^{10+}$ 15 μA . Non limités par la consommation nous avons obtenu avec le soufre naturel $^{32}\text{S}^{9+}$: 75 μA .
- Nous essayons depuis peu la méthode MIVOC (Metal Ions From Volatile Compounds)[²] avec le ferrocène Fe (C_5H_5)₂. La paroi de la chambre à plasma est recouverte d'un tube aluminium. Les premiers résultats (Fe^{13+} 25 μA Fe^{10+} 60 μA) stables pendant plusieurs heures nous incitent à poursuivre dans cette voie.

Objectifs et Développements

- Les possibilités de fonctionnement dès à présent au delà de 400 W puis la mise en exploitation de SPIRAL destiné à la production et à l'accélération de faisceaux d'ions radioactifs, exigent une augmentation sensible des intensités produites par les sources du faisceau primaire de GANIL.

L'objectif final est d'atteindre une puissance de faisceau de 6 kW sur la cible de production d'ions radioactifs. La première étape vise 2 kW pour quelques ions bien définis produits à partir de la source ECR4 située sur la plate-forme 100 kV.

ION	I source (2kW)	I source actuel
	μA	μA
13 C 3+	35	> 100
18 O 4+	35	> 200
36 Ar 10+	50	110
36 S 10+	50	75
24 Mg 7+	40	10
48 Ca 10 +	70	10
58 Ni 14+	70	3
86 Kr 14+	150	40

Tableau 2

Un effort de développement s'engage donc pour la production de faisceau haute intensité de Ca, Ni, Mg et Kr.

- Ils ont pour but la recherche de la méthode la mieux adaptée à chaque ion :
 - Utilisation de chambre en aluminium pour Ar, Kr, Ca, Mg, Ni
 - Polarisation des fours pour Ca et Ni
 - Nouveau type de four pour le Ni
 - Utilisation de paroi " chaude " pour minimiser la consommation de Ca⁴⁸ (feuille de Ta, isolée thermiquement de la paroi de la chambre à plasma, autochauffée par la HF et le plasma, assurant le recyclage des éléments à faible température de fonctionnement Ca, Mg)
 - Adaptation de la méthode MIVOC pour la production de Ni à partir du Nickelocène
- Des résultats sont attendus de la modification de la source ECR4 en ECR4M qui possède un meilleur confinement magnétique.
- Des essais sont en cours avec la source SuperShypie sur banc d'essai³.

[¹] SPIRAL : A Radioactive Ion Beam Facility at GANIL, A. Joubert and Al., Part. Acc. Conf. - Washington, USA, 17-21 mai 1993

[²] Metal Ions from the Volatile Compounds Method for the Production of metal Ion Beams, H. Koivisto, J. Arje, K. Nurmia, Proceedings : 7th International Conference on Ion Sources , 7-13 septembre 1997 - Taormine, Italie p 785

[³] Utilisation de la source SuperShypie, D. Leclerc and Al., Journées Sources d'Ions GANIL 99



Utilisation de la source d'ions "SUPERSHYPIE" pour des études de collisions à basse énergie ion-atome et ion-molécule

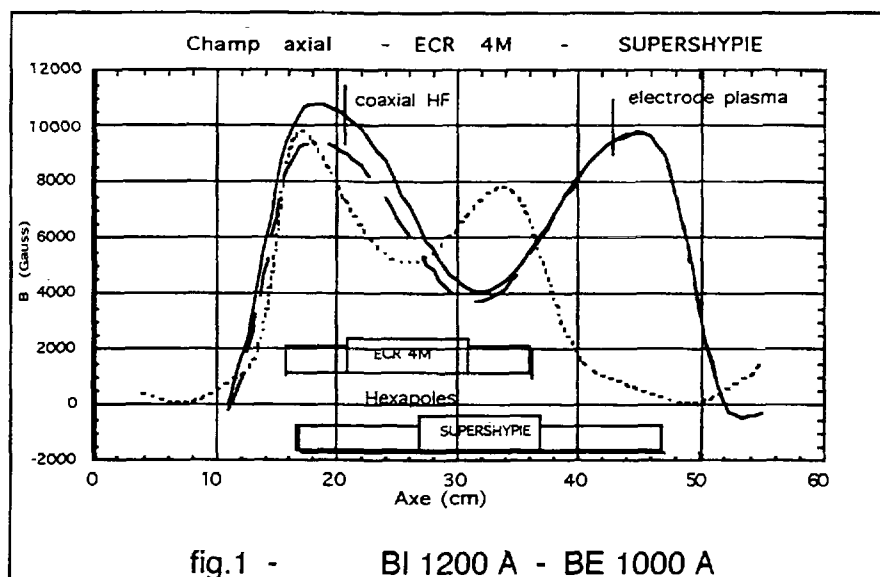
V.Bazin, P. Boduch, J.Y. Chesnel, F. Frémont, D. Lecler - CIRIL
J.Y. Pacquet, G. Gaubert, R. Leroy - GANIL

Depuis 1990, les recherches utilisant les sources d'ions ECR 3 (10 GHz), ECR 4, ECR 4M, NANOGAN II et "SUPERSHYPIE" (14,5GHz) du GANIL ont été menées par 4 laboratoires de Physique Atomique principalement par le Laboratoire de Spectroscopie Atomique (LSA—ISMRA) et par le Centre Interdisciplinaire de Recherche avec les Ions Lourds (CIRIL) regroupés cette année en Centre Interdisciplinaire de Recherche Ions Lasers.

Ces travaux d'étude de collisions Ion-Atome ont fait l'objet de 9 thèses de doctorat universitaire et de 60 publications dans des revues et des colloques.

SUPERSHYPIE :

La cavité plasma de la source ECR 4M de diamètre 64 mm et de longueur 176 mm a été portée à 285 mm. Les anneaux de fer doux de fermeture du champ axial ont été remplacés par des anneaux d'aimants permanents (hexapôles et orientation radiale). Le champ axial résultant des courants dans les bobines coté induction (BI), extraction (BE) et des anneaux est représenté sur la figure 1 et comparé à celui de ECR 4M. L'électrode plasma d'ouverture 10 mm et l'antenne HF coaxiale sont positionnées comme indiqué sur la figure. L'électrode plane d'extraction de diamètre 43 mm a une ouverture de 20 mm, sa distance par rapport à l'électrode plasma est réglable de 10 à 60 mm.



COLLISIONS Ar^{8+} - $\text{Cs}(6s,6p)$ - SPECTROSCOPIE PHOTONIQUE

Principe et but de l'expérience

A basse énergie, lors d'une collision entre un ion Ar^{8+} et une cible atomique alcaline, le processus dominant est la simple capture électronique. Les sections efficaces dépendent essentiellement de l'énergie de collision et du recouvrement des orbitales de l'ion incident et de l'atome cible. Les techniques de pompage optique par laser permettent de préparer la cible dans un état quantique donné; la polarisation du faisceau laser provoque l'alignement du nuage électronique de la cible et permet l'étude de l'influence du recouvrement des orbitales. Les collisions sur des cibles excitées et polarisées ont des applications dans le domaine des faisceaux d'ions polarisés nucléairement après transfert de polarisation du nuage électronique vers le noyau.

Montage expérimental

Les ions Ar^{8+} sont produits par une source ECR "SUPERSHYPIE" et sont focalisés sur un jet effusif de césium. L'optique de faisceau après le dipôle d'analyse comporte une lentille électrostatique (accélération, décélération) et un triplet de quadrupôles utilisé symétriquement. La source a été portée de 10 à 20 kV. Un ralentisseur, placé au centre de l'enceinte a permis de descendre à une énergie de collision de 2 qkeV.

Le jet de césium est produit par un four suivi d'un tube capillaire et d'un collimateur. Un détecteur de type Langmuir-Taylor permet de mesurer le nombre d'atomes par unité de volume.

Le pompage optique est assuré par deux diodes laser monomodes accordées et asservies sur deux transitions hyperfines de 6s vers 6p du ^{133}Cs de spin nucléaire $I=7/2$ (852 nm).

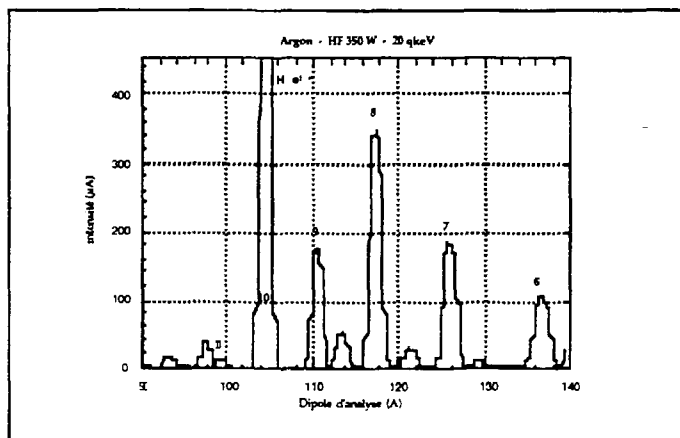
Une partie des photons émis (dans 4π stéradians) lors de la collision sont focalisés sur la fente d'entrée d'un spectromètre à réseau de haute résolution.

Cahier des charges pour la source d'ion

- Nécessité d'un faisceau suffisamment intense.
- Stabilité du faisceau pendant la durée (3 à 8 heures) d'expérience limitée par le fonctionnement du four de césium

Résultats de fonctionnement de SUPERSHYPIE

Pour Ar^{8+} , les meilleures performances ont été obtenues avec de l'hélium comme gaz support. La figure 2 présente le spectre typique obtenu



$I_{\text{source}} = 4,3 \text{ mA}$

$BI = 1226 \text{ A}$

$BE = 945 \text{ A}$

$CF_{\text{exp}} = 318 \mu\text{A}$

fig. 2

Performances de la source SUPERSHYPIE dans le cadre des expériences de collisions.

Ion projectile	cible	source kV	collision qkeV	intensité du faisceau (μ A)	fluctuations	durée
Ar ⁸⁺	Cs(6s)	20	20	245	4%	3 h 45
Ar ⁸⁺	Cs(6s)	20	15	260	2,7%	2 h 30
Ar ⁸⁺	Cs(6s)	20	10	275	3%	2 h 20
Ar ⁸⁺	Cs(6s)	14	5	173	5%	3 h 15
Ar ⁸⁺	Cs(6s)	14	2	157	4%	5 h
Ar ⁸⁺	Cs(6p)	20	20	260	4%	6 h
Ar ⁸⁺	Cs(6p)	20	15	265	3%	3 h
Ar ⁸⁺	Cs(6p)	20	10	280	3%	3 h
Ar ⁸⁺	Cs(6p)	15	5	231	3%	3 h 15
Ar ⁸⁺	Cs(6p)	14	2	214	3%	7 h 30

COLLISIONS IONS-MOLECULES (CO, H₂) - SPECTROSCOPIE DES IONS DE RECUL et COLLISIONS IONS-ATOME Ar¹⁷⁺ - He - SPECTROSCOPIE D'ELECTRONS

Principe et but de l'expérience

La fragmentation des molécules permet d'approfondir la recherche fondamentale sur la nature et la dynamique de la structure moléculaire. Lors des collisions entre des hautement chargés et une molécule il y a ionisation et excitation. Il en résulte une fragmentation. L'analyse de la direction et de la vitesse des fragments moléculaires permet de connaître les états excités de la molécule peuplés par la collision.

Un autre procédé consiste à étudier la spectroscopie des électrons Auger émis à la suite des captures d'électrons de l'atome ou de la molécule par l'ion projectile. L'observation de la vitesse et de la direction d'émission après double capture permet de mesurer la section efficace de captures simultanées et corrélées ou successives.

Montage expérimental

Les ions produits par la source ECR "SUPERSHYPIE" doivent former un faisceau fin (2 x 2 mm) et de très faible émittance qui croise le jet atomique à la sortie de la buse en graphite au centre de l'enceinte. Le spectromètre électrostatique de haute résolution est porté par un anneau centré sur le point de collision. Les spectres obtenus permettent l'analyse en énergie et en angle des électrons ou des ions émis.

L'optique après le dipôle d'analyse, lentille électrostatique, permet de former un faisceau que l'on collimate à l'aide d'un diaphragme de fentes (\approx 2 x 2 mm mais réglables). Devant le cylindre de Faraday (Cf) placé en bout de ligne à la sortie de l'enceinte est placé un diaphragme (Dph.) de 2 x 2 mm. Le réglage de la source et de

tous les éléments d'optique de faisceau consiste à obtenir dans la pratique, la meilleure intensité de faisceau sur Cf associée au plus faible rapport possible Dph/Cf (voir le tableau ci-dessous). Cependant, dans ce cas, l'intensité sur Cf est de 1% à 1,5% de celle mesurée après la fente image du dipole d'analyse.

Cahier des charges pour la source d'ions

- La meilleure performance en intensité et qualité de faisceau pour les hauts états de charge;
- Stabilité, sans intervention pendant la durée d'acquisition des spectres (1/2 à 1 heure) et aussi d'une expérience complète de 3 à 8 heures.

Résultats de fonctionnement de SUPERSHYPIE

Les figures et le tableau qui suivent illustrent les remarquables performances de SUPERSHYPIE pour la production des hauts états de charge et pour sa stabilité. Cependant, si l'on compare l'intensité du "courant source" à celle mesurée après l'extraction et par l'intégrale du spectre obtenu, le meilleur rapport est de 50% mais peut descendre à 15%.

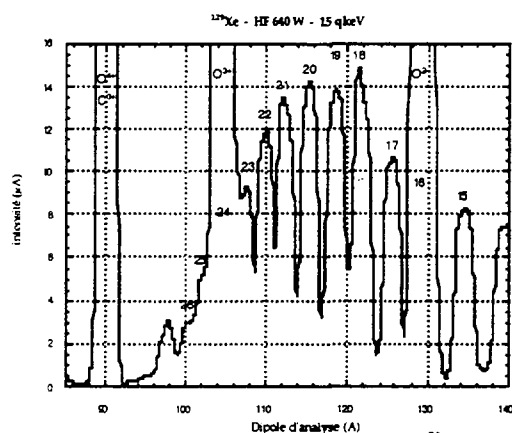


fig. 3

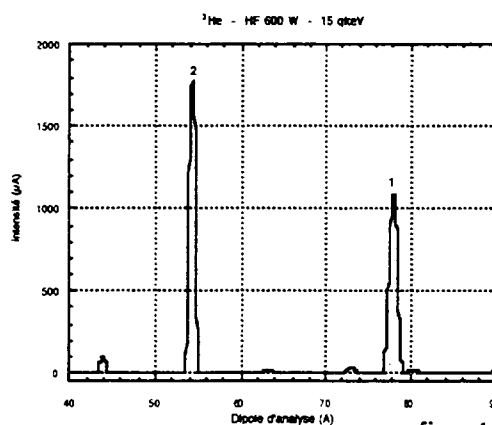


fig. 4

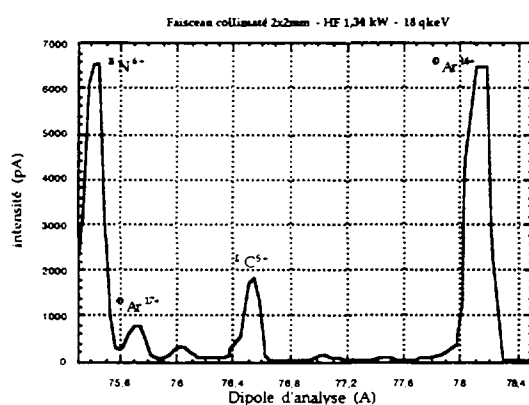


fig. 6

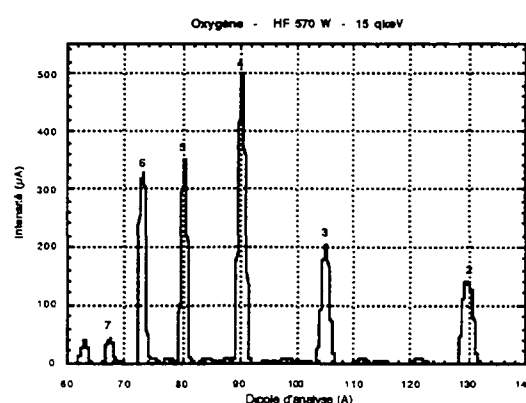


fig. 5

Il faut noter sur la figure 6 la qualité du spectre obtenu après collimation, la source réglée pour Ar^{17+} a une puissance HF de 1,34 kW. Proche de 1 nA sur Cf, l'intensité après la fente image du dipôle d'analyse fermée à 2,5 mm était de 100 nA et stable pendant les 4 heures d'acquisition.

Performances de la source SUPERSHYPIE lors des expériences de collisions
ions-molécules.

ion projectile	cibles	source kV	intensité sur Cf (nA)	intensité sur Dph (nA)	fluctuations	durée
Xe ²³⁺	H ₂ ,CO	15	155	40	16%	8 h
Xe ²³⁺	H ₂ ,CO	5	50	10	20%	6 h
He ²⁺	H ₂	15	137	40	6%	5 h
He ¹⁺	H ₂	10	220	70	7%	3 h
O ⁷⁺	CO	7	220	55	4,5%	3 h
O ⁵⁺	H ₂	15	230	30	4,5%	3 h
Xe ²³⁺	He	15	200	40	7,5%	3 h
Ar ¹⁷⁺	He	17	0,7-1,0	1,0	20%	4 h
Ar ¹⁶⁺	He	17	10	7	2%	0 h 30

Conclusion

En tant qu'expérimentateurs et utilisateurs de la source SUPERSHYPIE, nous exprimons notre grande satisfaction en particulier sur ses performances pour les hauts états de charge, sur son réglage assez souple et sa grande stabilité. Ce sont sur ces points que nous avons ressenti une différence par comparaison avec l'ECR 4M.

Nous remercions fortement l'équipe "sources d'ions" du GANIL pour leur compétence, l'entente avec eux et leur effort pour satisfaire nos besoins de physiciens.

Don 16

Utilisation de la source d'ions "SUPERSHYPIE" pour des études de collisions à basse énergie ion-atome et ion-molécule

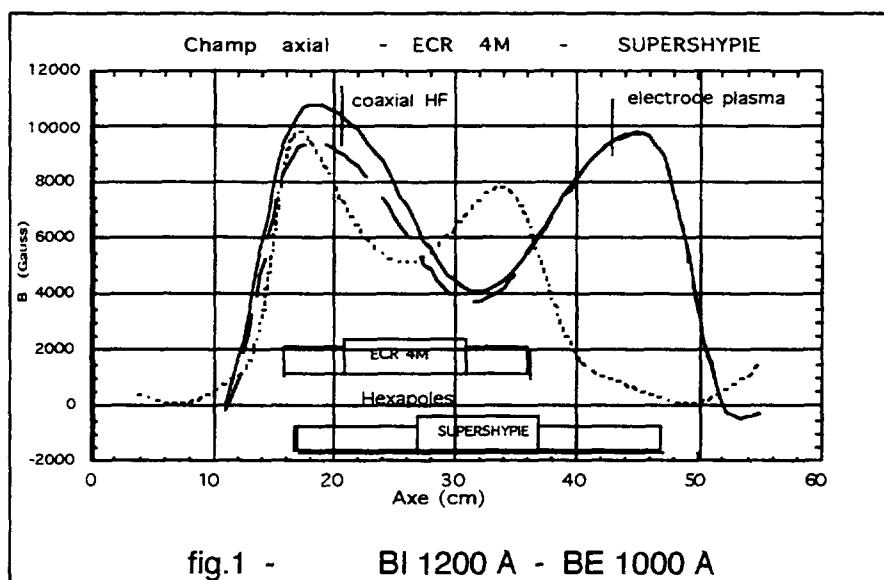
V.Bazin, P. Boduch, J.Y. Chesnel, F. Frémont, D. Lecler - CIRIL
J.Y. Pacquet, G. Gaubert, R. Leroy - GANIL

Depuis 1990, les recherches utilisant les sources d'ions ECR 3 (10 GHz), ECR 4, ECR 4M, NANOGAN II et "SUPERSHYPIE" (14,5GHz) du GANIL ont été menées par 4 laboratoires de Physique Atomique principalement par le Laboratoire de Spectroscopie Atomique (LSA—ISMRA) et par le Centre Interdisciplinaire de Recherche avec les Ions Lourds (CIRIL) regroupés cette année en Centre Interdisciplinaire de Recherche Ions Lasers.

Ces travaux d'étude de collisions Ion-Atome ont fait l'objet de 9 thèses de doctorat universitaire et de 60 publications dans des revues et des colloques.

SUPERSHYPIE :

La cavité plasma de la source ECR 4M de diamètre 64 mm et de longueur 176 mm a été portée à 285 mm. Les anneaux de fer doux de fermeture du champ axial ont été remplacés par des anneaux d'aimants permanents (hexapôles et orientation radiale). Le champ axial résultant des courants dans les bobines coté induction (BI), extraction (BE) et des anneaux est représenté sur la figure 1 et comparé à celui de ECR 4M. L'électrode plasma d'ouverture 10 mm et l'antenne HF coaxiale sont positionnées comme indiqué sur la figure. L'électrode plane d'extraction de diamètre 43 mm a une ouverture de 20 mm, sa distance par rapport à l'électrode plasma est réglable de 10 à 60 mm.



COLLISIONS Ar^{8+} - $\text{Cs}(6s,6p)$ - SPECTROSCOPIE PHOTONIQUE

Principe et but de l'expérience

A basse énergie, lors d'une collision entre un ion Ar^{q+} et une cible atomique alcaline, le processus dominant est la simple capture électronique. Les sections efficaces dépendent essentiellement de l'énergie de collision et du recouvrement des orbitales de l'ion incident et de l'atome cible. Les techniques de pompage optique par laser permettent de préparer la cible dans un état quantique donné; la polarisation du faisceau laser provoque l'alignement du nuage électronique de la cible et permet l'étude de l'influence du recouvrement des orbitales. Les collisions sur des cibles excitées et polarisées ont des applications dans le domaine des faisceaux d'ions polarisés nucléairement après transfert de polarisation du nuage électronique vers le noyau.

Montage expérimental

Les ions Ar^{8+} sont produits par une source ECR "SUPERSHYPIE" et sont focalisés sur un jet effusif de césium. L'optique de faisceau après le dipole d'analyse comporte une lentille électrostatique (accélération, décélération) et un triplet de quadrupôles utilisé symétriquement. La source a été portée de 10 à 20 kV. Un ralentisseur, placé au centre de l'enceinte a permis de descendre à une énergie de collision de 2 qkeV.

Le jet de césium est produit par un four suivi d'un tube capillaire et d'un collimateur. Un détecteur de type Langmuir-Taylor permet de mesurer le nombre d'atomes par unité de volume.

Le pompage optique est assuré par deux diodes laser monomodes accordées et asservies sur deux transitions hyperfines de 6s vers 6p du ^{133}Cs de spin nucléaire $I=7/2$ (852 nm).

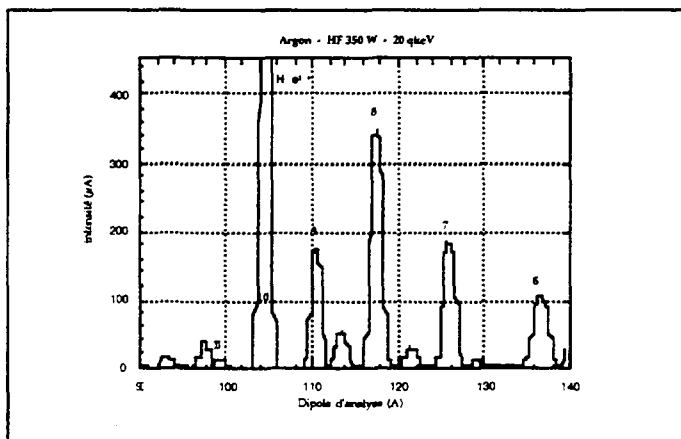
Une partie des photons émis (dans 4π stéradians) lors de la collision sont focalisés sur la fente d'entrée d'un spectromètre à réseau de haute résolution.

Cahier des charges pour la source d'ion

- Nécessité d'un faisceau suffisamment intense.
- Stabilité du faisceau pendant la durée (3 à 8 heures) d'expérience limitée par le fonctionnement du four de césium

Résultats de fonctionnement de SUPERSHYPIE

Pour Ar^{8+} , les meilleures performances ont été obtenues avec de l'hélium comme gaz support. La figure 2 présente le spectre typique obtenu



$I_{\text{source}} = 4,3 \text{ mA}$

$BI = 1226 \text{ A}$

$BE = 945 \text{ A}$

$CF_{\text{exp}} = 318 \mu\text{A}$

fig. 2

Performances de la source SUPERSHYPIE dans le cadre des expériences de collisions.

Ion projectile	cible	source kV	collision qkeV	intensité du faisceau (μA)	fluctuations	durée
Ar ⁸⁺	Cs(6s)	20	20	245	4%	3 h 45
Ar ⁸⁺	Cs(6s)	20	15	260	2,7%	2 h 30
Ar ⁸⁺	Cs(6s)	20	10	275	3%	2 h 20
Ar ⁸⁺	Cs(6s)	14	5	173	5%	3 h 15
Ar ⁸⁺	Cs(6s)	14	2	157	4%	5 h
Ar ⁸⁺	Cs(6p)	20	20	260	4%	6 h
Ar ⁸⁺	Cs(6p)	20	15	265	3%	3 h
Ar ⁸⁺	Cs(6p)	20	10	280	3%	3 h
Ar ⁸⁺	Cs(6p)	15	5	231	3%	3 h 15
Ar ⁸⁺	Cs(6p)	14	2	214	3%	7 h 30

COLLISIONS IONS-MOLECULES (CO, H₂) - SPECTROSCOPIE DES IONS DE RECUL et COLLISIONS IONS-ATOME Ar¹⁷⁺ - He - SPECTROSCOPIE D'ELECTRONS

Principe et but de l'expérience

La fragmentation des molécules permet d'approfondir la recherche fondamentale sur la nature et la dynamique de la structure moléculaire. Lors des collisions entre des hautement chargés et une molécule il y a ionisation et excitation. Il en résulte une fragmentation. L'analyse de la direction et de la vitesse des fragments moléculaires permet de connaître les états excités de la molécule peuplés par la collision.

Un autre procédé consiste à étudier la spectroscopie des électrons Auger émis à la suite des captures d'électrons de l'atome ou de la molécule par l'ion projectile. L'observation de la vitesse et de la direction d'émission après double capture permet de mesurer la section efficace de captures simultanées et corrélées ou successives.

Montage expérimental

Les ions produits par la source ECR "SUPERSHYPIE" doivent former un faisceau fin (2 x 2 mm) et de très faible émittance qui croise le jet atomique à la sortie de la buse en graphite au centre de l'enceinte. Le spectromètre électrostatique de haute résolution est porté par un anneau centré sur le point de collision. Les spectres obtenus permettent l'analyse en énergie et en angle des électrons ou des ions émis.

L'optique après le dipôle d'analyse, lentille électrostatique, permet de former un faisceau que l'on collimate à l'aide d'un diaphragme de fentes ($\approx 2 \times 2$ mm mais réglables). Devant le cylindre de Faraday (Cf) placé en bout de ligne à la sortie de l'enceinte est placé un diaphragme (Dph.) de 2 x 2 mm. Le réglage de la source et de

tous les éléments d'optique de faisceau consiste à obtenir dans la pratique, la meilleure intensité de faisceau sur Cf associée au plus faible rapport possible Dph/Cf (voir le tableau ci-dessous). Cependant, dans ce cas, l'intensité sur Cf est de 1% à 1,5% de celle mesurée après la fente image du dipole d'analyse.

Cahier des charges pour la source d'ions

- La meilleure performance en intensité et qualité de faisceau pour les hauts états de charge;
- Stabilité, sans intervention pendant la durée d'acquisition des spectres (1/2 à 1 heure) et aussi d'une expérience complète de 3 à 8 heures.

Résultats de fonctionnement de SUPERSHYPIE

Les figures et le tableau qui suivent illustrent les remarquables performances de SUPERSHYPIE pour la production des hauts états de charge et pour sa stabilité. Cependant, si l'on compare l'intensité du "courant source" à celle mesurée après l'extraction et par l'intégrale du spectre obtenu, le meilleur rapport est de 50% mais peut descendre à 15%.

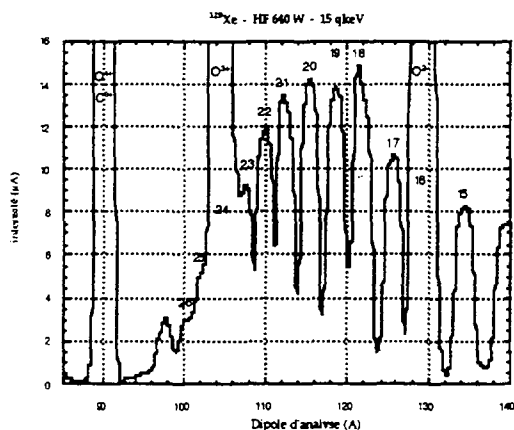


fig. 3

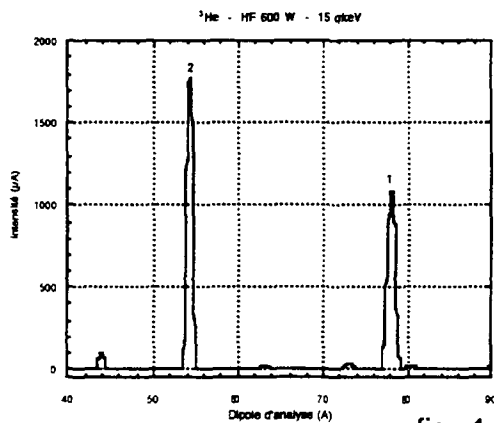


fig. 4

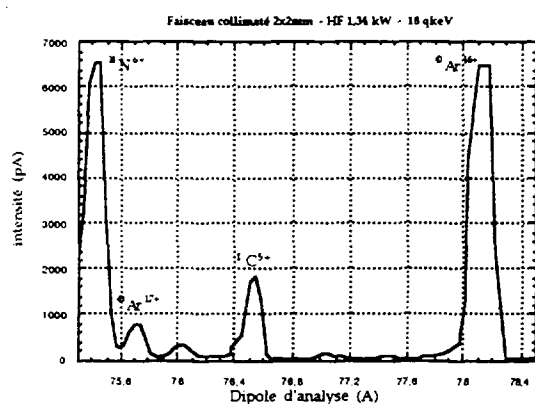


fig. 6

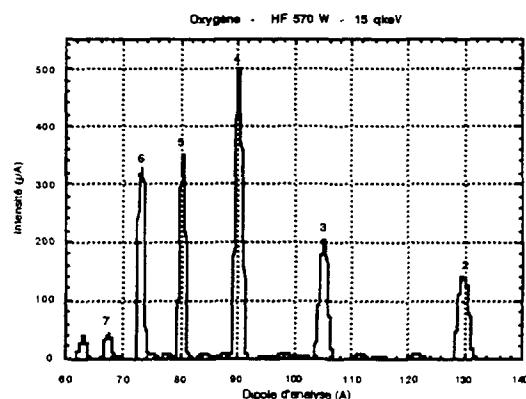


fig. 5

Il faut noter sur la figure 6 la qualité du spectre obtenu après collimation, la source réglée pour Ar^{17+} a une puissance HF de 1,34 kW. Proche de 1 nA sur Cf, l'intensité après la fente image du dipôle d'analyse fermée à 2,5 mm était de 100 nA et stable pendant les 4 heures d'acquisition.

Performances de la source SUPERSHYPIE lors des expériences de collisions
ions-molécules.

ion projectile	cibles	source kV	intensité sur Cf (nA)	intensité sur Dph (nA)	fluctuations	durée
Xe ²³⁺	H ₂ ,CO	15	155	40	16%	8 h
Xe ²³⁺	H ₂ ,CO	5	50	10	20%	6 h
He ²⁺	H ₂	15	137	40	6%	5 h
He ¹⁺	H ₂	10	220	70	7%	3 h
O ⁷⁺	CO	7	220	55	4,5%	3 h
O ⁵⁺	H ₂	15	230	30	4,5%	3 h
Xe ²³⁺	He	15	200	40	7,5%	3 h
Ar ¹⁷⁺	He	17	0,7-1,0	1,0	20%	4 h
Ar ¹⁶⁺	He	17	10	7	2%	0 h 30

Conclusion

En tant qu'expérimentateurs et utilisateurs de la source SUPERSHYPIE, nous exprimons notre grande satisfaction en particulier sur ses performances pour les hauts états de charge, sur son réglage assez souple et sa grande stabilité. Ce sont sur ces points que nous avons ressenti une différence par comparaison avec l'ECR 4M.

Nous remercions fortement l'équipe "sources d'ions" du GANIL pour leur compétence, l'entente avec eux et leur effort pour satisfaire nos besoins de physiciens.

La production d'ions radioactifs à SPIRAL

F. Landré-Pellemoine⁽¹⁾, J.C. Angelique⁽²⁾, O. Bajeat⁽⁴⁾, C. Barué⁽¹⁾, B. Blank⁽³⁾, F. Clapier⁽⁴⁾, M. Ducourtieux⁽⁴⁾, G. Gaubert⁽¹⁾, Y. Huguet⁽¹⁾, P. Jardin⁽¹⁾, S. Kandri-Rody⁽¹⁾, T. Lamy⁽⁶⁾, N. Lecesne⁽¹⁾, R. Leroy⁽¹⁾, M. Lewitowicz⁽¹⁾, R. Lichtenthäler⁽⁵⁾, C. Marry⁽¹⁾, L. Maunoury⁽¹⁾, J. Ober⁽⁴⁾, N.A. Orr⁽²⁾, J.Y. Pacquet⁽¹⁾, J. Proust⁽⁴⁾, J.C. Putaux⁽⁴⁾, M.G. Saint Laurent⁽¹⁾, J.P. Rataud⁽¹⁾, P. Sortais⁽⁶⁾ et A.C.C. Villari⁽¹⁾.

- (1) GANIL, BP 5027, 14076 CAEN CEDEX 5, FRANCE
(2) LPC-ISMRA, Bld. Maréchal Juin, 14050 Caen, FRANCE
(3) CENBG, BP 120, 33175 Gradignan Cedex, FRANCE
(4) IPN, 91406 Orsay Cedex, FRANCE
(5) IFUSP, CP 20516, 01498 São Paulo SP, BRASIL
(6) ISN, Ave des Martyrs, 38026 Grenoble, FRANCE



FR9903401

Introduction

La production d'ions radioactifs se fait déjà depuis de nombreuses années pour étudier les propriétés de ces noyaux, notamment à ISOLDE au CERN[ISO-99]. Plus récemment, on a commencé à les utiliser en tant que faisceau pour les faire interagir avec d'autres noyaux lors de réactions nucléaires. En effet, un noyau dévoile beaucoup plus d'informations sur sa nature lorsqu'il est mis à contribution dans diverses réactions que lorsqu'il est simplement observé par spectrométrie.

Ces noyaux n'existant pas dans la nature et ayant des temps de vie très courts, vont être fabriqués en laboratoire et être conditionnés sous forme de faisceaux d'ions radioactifs. SPIRAL (Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne) permettra de fournir ce type de faisceau dans une gamme d'énergie comprise entre 1,7 et 25 MeV/A avec de bonnes qualités optiques [SPI-94].

Ce système est basé sur la méthode ISOL (Isotopic Separation On Line) où le faisceau primaire fourni par GANIL est totalement arrêté dans une cible de carbone épaisse. Les atomes radioactifs, créés lors des réactions nucléaires entre les noyaux projectiles et les noyaux de la cible, vont sortir de cette cible par diffusion pour être ionisés par une source avant d'être triés, accélérés et distribués dans les aires expérimentales.

Pour produire des noyaux exotiques, seul quelques pourcents des noyaux du projectile vont interagir avec ceux de la cible. Le flux incident d'un faisceau primaire au GANIL est typiquement de 2.10^{13} pps pour les projectiles de masse inférieure à 40 u.m.a. Par exemple pour un faisceau primaire de ^{20}Ne avec une intensité de $1,97.10^{13}$ pps, le taux de production du ^{19}Ne sera de $7,56.10^8$ pps pour SPIRAL et seulement de $4,7.10^5$ pps pour le ^{17}Ne . L'intérêt du projet SPIRAL est de fournir des faisceaux secondaires le plus intense possible, la production doit être optimisée.

Optimisation de la production d'ions radioactifs

GANIL accélère des faisceaux primaires d'ions stables dans une gamme d'énergie allant de 25 à 100 MeV/A, le mécanisme le plus efficace pour la production de noyaux exotiques est la fragmentation.

Dans ce cas, le taux de production est amélioré par le choix d'une cible ayant un Z petit et un projectile supérieur mais le plus proche possible du noyaux d'intérêt [MAU-98].

Une fois produit par réaction nucléaire au sein de la cible, l'atome va diffuser. Pour être utilisables leur durée de vie doit être supérieure au temps mis pour voyager de la cible jusqu'aux aires expérimentales, soit une plage de quelques millièmes de secondes à quelques minutes. Il faut donc qu'ils sortent de la cible le plus rapidement possible.

Optimisation de la diffusion

La diffusion est gouvernée par cinq paramètres [MAU-98] :

- Les deux coefficients d'Arrhénius ($\text{Log}(D_0)$ et E_a) qui sont liés au couple cible - atome diffusant.

- La température : la figure 1, représentant l'efficacité de diffusion en fonction de la température, montre l'intérêt d'avoir une cible la plus chaude possible.

- La structure de la cible : cette même figure représente l'efficacité pour deux tailles de grain (4 et $15\mu\text{m}$) et l'estime pour un grain de $1\mu\text{m}$. Il faut une taille de grain la plus petite possible.

- Le temps de vie : ce temps limite l'efficacité de diffusion pour les atomes de temps de vie court car ils risquent d'être désintégrés avant de sortir du grain, d'où l'intérêt d'avoir, une fois de plus, un grain le plus petit possible.

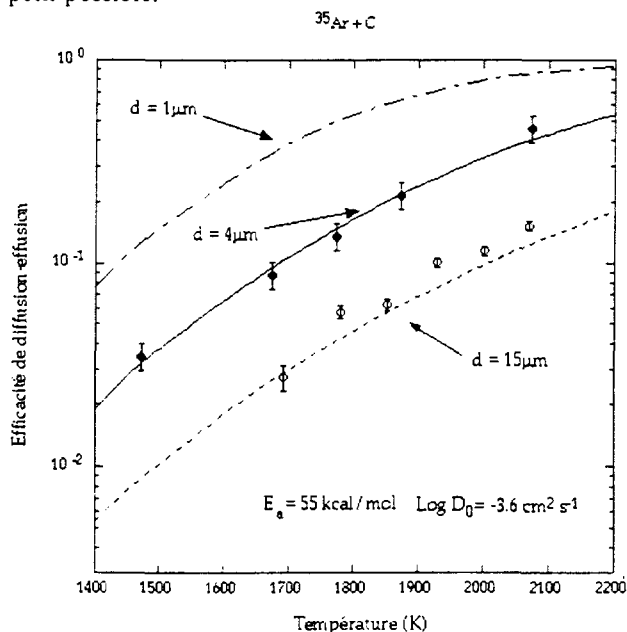


Figure 1 - Efficacité de diffusion en fonction de la température pour différentes tailles de grain de carbone (l'efficacité a été mesurée pour des grains de 4 et $15\mu\text{m}$ et a été estimée pour des grains de $1\mu\text{m}$).

En vue de ces contraintes, la cible utilisée sur SPIRAL aura une taille de grain de $4\mu\text{m}$ et sera chauffée à des températures de l'ordre de 2000°C . Une étude est en cours de réalisation pour vérifier l'amélioration de la diffusion avec un carbone de grain de $1\mu\text{m}$.

Suivant le type de faisceau demandé par les utilisateurs, les configurations des ensembles cible-source ne seront pas les mêmes pour les gaz rares et les alcalins.

Ensemble cible - source NANOGAN III

Pour sa mise en route, SPIRAL fonctionnera avec un ensemble spécifique cible-source NANOGAN III, dédié aux gaz rares.

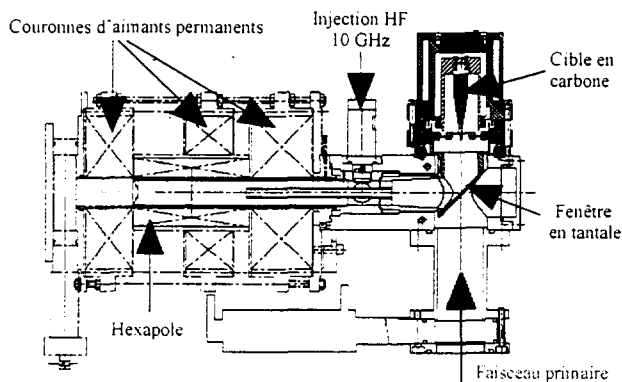


Figure 2 - Ensemble cible - source NANOGAN III

Le faisceau primaire est totalement arrêté dans la cible en carbone. Les atomes radioactifs vont sortir de la cible par diffusion et vont finir par atteindre la source d'ionisation (figure 2). Tous les éléments non gazeux, les "condensables", vont être collés irrémédiablement sur les parois froides de l'ensemble. Seuls les gaz vont atteindre la chambre d'ionisation.

Pour le fonctionnement du cyclotron CIME (Cyclotron pour les Ions de Moyenne Energie), il est nécessaire d'avoir des états de charges élevés imposant ainsi le choix d'une source ECR (à Résonance Electronique Cyclotronique).

Cet ensemble va être remplacé tous les quinze jours pour diverses raisons : c'est le temps de vie estimé de la cible en carbone et c'est aussi pour limiter l'irradiation de l'ensemble. (La source pourra être réutilisée ultérieurement). Ce changement se fera de façon automatique sans intervention humaine dans les zones irradiées. L'ensemble est fermé par deux vannes (une, côté haute énergie et une, côté très basse énergie) limitant la contamination de l'air dans la casemate.

Enfin, la source est constituée d'aimants permanents permettant d'avoir un ensemble compact, ce qui va limiter les coûts de retraitements.

Cet ensemble a été testé en ligne avec une cible chauffée à 2000°C sur le banc de test SIRa. Un spectre d'Argon 40 est présenté ci dessous (figure 3). L'efficacité d'ionisation totale est de 100 % pour les gaz rares et le pic en $8+$ présente une efficacité relative de 16 % en particules. Lors de tests hors ligne sur SPIRAL, cette efficacité a atteint une valeur de 25 %.

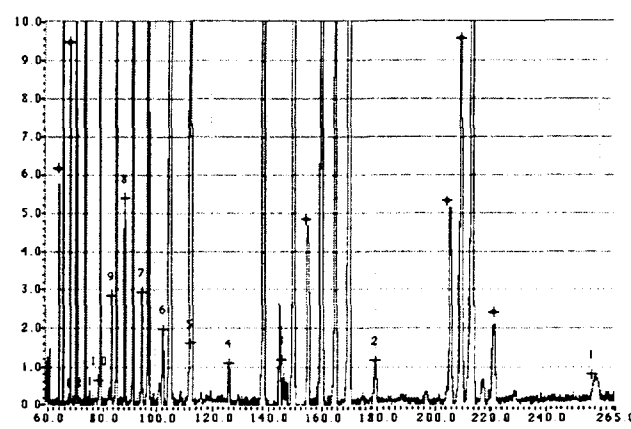


Figure 3 - Spectre d' ^{40}Ar réalisé lors de tests en ligne sur SIRa avec une cible à 2000°C .

Ensemble cible - source MONOLITHE (MONOchargé de Lithium Exotique)

Cet ensemble entre dans le cadre du projet $1+/-n+$ [TAM-97]. La forte demande des physiciens pour étudier le phénomène de "Halo" et plus particulièrement le ^{11}Li , nous a conduit à développer un ensemble dédié aux Alcalins.

Le ^{11}Li est un condensable et a un temps de demi vie de 8,7ms, le chemin entre la cible et la source doit être minimisé, la source devra être intégrée à la cible. Le potentiel d'ionisation est de 5,39eV. La source la mieux adaptée est donc une source à ionisation de surface en tungstène, qui une fois oxydé, a un travail de sortie de 6,24 eV.

La production se fait par fragmentation du projectile (on utilise un faisceau primaire d' ^{18}O à 78MeV/A). En vue du parcours très grand du Lithium dans le carbone, celui ci va s'arrêter dans une zone froide à l'arrière de la cible défavorisant la diffusion des atomes. Une cible en deux parties est donc utilisée, la première (cible de production), arrêtant le faisceau primaire, va être refroidie pour dissiper la puissance du faisceau, et la seconde (cible de diffusion), où vont être arrêtés les atomes de Lithium, va être chauffée à 2000°C .

Pour favoriser l'effusion et guider les atomes vers la source, des petits canaux de 1 mm de diamètre ont été creusés (Figure 4).

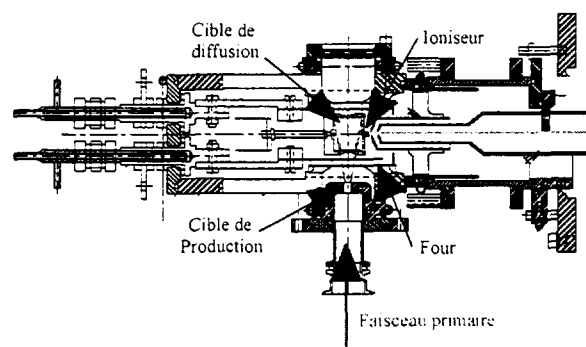


Figure 4 - Ensemble cible-source MONOLITHE

Nous n'avons pas encore obtenu de résultats expérimentaux en ligne avec un faisceau radioactif mais seulement des premiers tests hors ligne réalisés pour

vérifier la tenue à haute température de l'ensemble. Le spectre suivant a été réalisé avec des impuretés résiduelles et montre le bon fonctionnement de la source (figure 5).

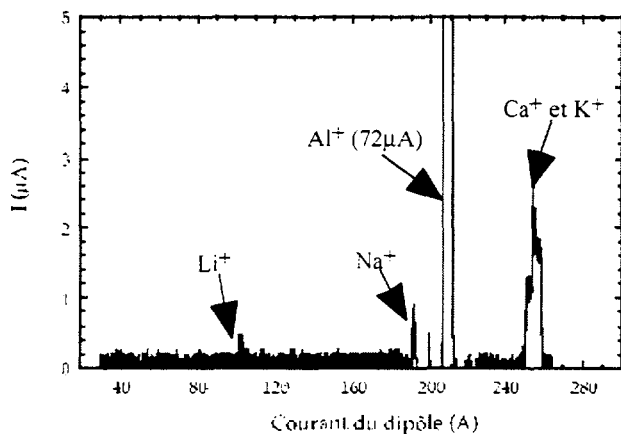


Figure 5 - Spectre réalisé hors ligne lors de tests sur la tenue à haute température de l'ensemble.

Perspectives

Etant donné la demande des utilisateurs, un nouvel ensemble est en court d'étude, il sera dédié à l'Hélium. A l'heure actuelle, les études s'orientent vers deux voies gouvernées par le choix du mode de production.

Le premier choix s'oriente vers la production par fragmentation de la cible avec un ensemble cible-source du type NANOGAN III.

La deuxième méthode, quant à elle, se basera sur la fragmentation à la fois du projectile et de la cible augmentant ainsi de façon non négligeable le taux de production. L'utilisation de trois cibles serait alors nécessaire.

Références

[ISO-99] B. Jonson and A. Richter, *More than three decades of ISOLDE Physics*, CERN-EP-99-040.

[MAU-98] L. Maunoury et al., *Production de faisceaux d'ions radioactifs multichargés pour SPIRAL : Etudes et réalisation du premier ensemble cible-source*, thèse de l'Université de Caen, Novembre 98.

[SPI-94] *The SPIRAL Radioactive Ion Beam Facility*, GANIL Report R 94 02 (1994).

[TAM-97] C. Tamburella et al., *Production of multicharged radioactive ion beams : the $1+$ to $n+$ charge state transformation for the Production, Ionisation, Acceleration de Faisceaux Exotiques project*, Review of scientific Instrument, Vol 68, No 6, June 1997.



FR9903402

Nouvelles sources ECR au GANIL

SERVICE CIBLE SOURCE SPIRAL

P JARDIN, J-Y PACQUET, R LEROY, G GAUBERT, Y HUGUET, N LECESNE, ACC VILLARI, F LANDRE, C BARUE, J-P RATAUD

GANIL, Bd Henri Becquerel, BP 5027. 14076 CAEN cedex 5.
Adresse E mail: nom@ganil.fr

Résumé

Un principe original de structure magnétique a permis de concevoir une source ECR d'ions faiblement chargés qui délivre un faisceau de symétrie parfaitement cylindrique. Ce principe donnera lieu au cours de l'année 1999 à la réalisation d'une source monochargée optimisée pour répondre aux futurs développements du projet SPIRAL, et à la réalisation d'une source d'ions multichargés.

Outre ces trois sources, une légère transformation de la source ECR4 a permis d'améliorer considérablement ses performances et sa stabilité.

Introduction

Dans le cadre du projet SPIRAL (Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne), la possibilité de produire des ions grâce à la méthode baptisée "1+/n+" est étudiée au sein d'une collaboration entre le GANIL Caen pour la partie "1+" et l'ISN de Grenoble pour la partie "n+".

Actuellement, les atomes radioactifs sont produits au cours de la collision entre les ions "haute énergie" (~60MeV/A à ~100MeV/A) délivrés par le cyclotron CSS2 du Ganil et les atomes d'une cible de carbone. Les atomes radioactifs sont stoppés dans l'épaisseur de la cible, d'où ils diffusent pour atteindre la chambre d'une source ECR d'ions multichargés (Nanogan III). Après extraction de la source, les ions de masse et d'état de charge désiré sont sélectionnés par un dipôle magnétique puis guidés jusqu'au cyclotron accélérateur avant d'être dirigé vers les salles d'expérience. Pour éviter que les atomes radioactifs aient le temps de se transformer au cours de leur transit entre la cible et la source, la source est située au plus près de la cible. Parce que cette proximité intervient directement sur l'efficacité de production, ces deux éléments, cible et source, forment un ensemble compact appelé ECS (Ensemble Cible Source). Pour des raisons d'activité produite au cours de la collision, l'ECS est installé dans une casemate blindée, d'où il est retiré tous les 15 jours pour être remplacé, puis considéré comme déchet.

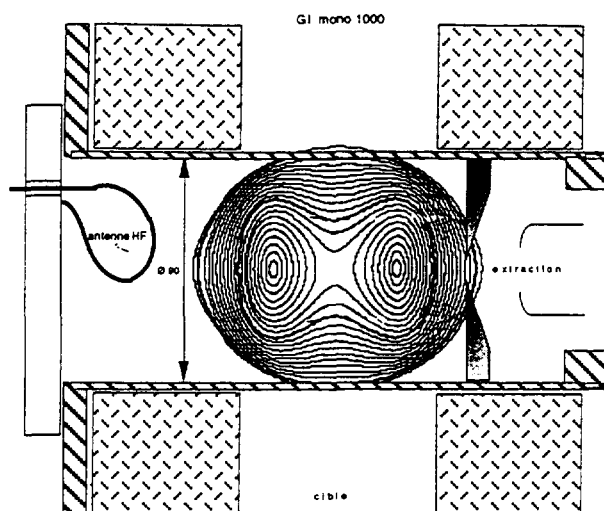
Cette solution implique un volume de déchet annuel de l'ordre de 600 kg, et des contraintes de budget et d'exploitation qu'il paraît évident de vouloir réduire.

Dans ce but, la méthode de production 1+/n+ a été proposée. Il s'agit de remplacer à l'intérieur de la casemate la source Nanogan III par une source d'ions monochargés. Cette source permettra d'ioniser les atomes radioactifs pour pouvoir les transporter à l'extérieur de la casemate où ils seront portés à des états de charge supérieurs à la suite de leur injection dans une source ECR d'ions multichargés.

Le groupe cible/source du GANIL a donc développé une nouvelle source ECR d'ions monochargés (GI MONO 1000) dont la taille, la simplicité, la fiabilité, l'efficacité, le coût répondent aux contraintes imposées d'une part par son exploitation et d'autre part par son association à la cible et à la source n+.

Description du prototype de générateur d'ions à résonance cyclotronique électronique GI MONO 1000

La chambre à vide du prototype de générateur d'ions à résonance cyclotronique électronique "GI MONO 1000" (voir figure ci dessous) est constituée d'un cylindre en cuivre non refroidi dont le diamètre intérieur est de 90 mm et la longueur de 230 mm. La structure magnétique à aimants permanents assure un volume de $\approx 500 \text{ cm}^3$ magnétiquement confiné par une surface fermée dont le module de champ est de 2100gauss. Le champ magnétique minimum à l'intérieur de ce volume est égal à 0, ce qui permet une gamme de fréquence de résonance importante. L'onde H.F. utilisée est fournie par un émetteur à puissance variable de 200W, 2.45GHz. L'onde est injectée dans la chambre à l'aide d'un passage coaxial terminé par une antenne. L'électrode plasma est située dans un champ magnétique présentant un module de 1800 gauss.



Résultats préliminaires

Production de faisceaux de gaz rares monochargés

Les premiers essais ont été effectués avec un trou dans l'électrode plasma de diamètre 2 mm. Le fonctionnement avec différents gaz argon, néon et hélium dont les énergies de simple ionisation s'échelonnent entre 16 et 25eV montre que la source démarre avec une pression dans l'enceinte de l'ordre de $2 \cdot 10^{-6}$ mbar à une puissance d'environ 20W.

Le tableau ci-après montre la dépendance des intensités d' Ar^+ avec le diamètre du trou de l'électrode plasma.

Diamètre du trou de l'électrode plasma	2mm	5mm	7,5mm
Ar^+			
Efficacité de transport		86%	82%
Courant extrait (mA/cm^2)	1,62	1,41*	1,39*
He^+			
Efficacité de transport		87%	53%
Courant extrait (mA/cm^2)		3,28*	4,27*

* courants corrigés du transport.

Les résultats en Ar ont été obtenus pour les conditions suivantes:

- courant débité par la source
- flux d'argon injecté dans la source au travers d'une fuite calibrée
- gaz support utilisé

550 μAe
36,7 μAp
He

Efficacité d'ionisation d'un élément condensable à partir d'une molécule gazeuse (SO_2).

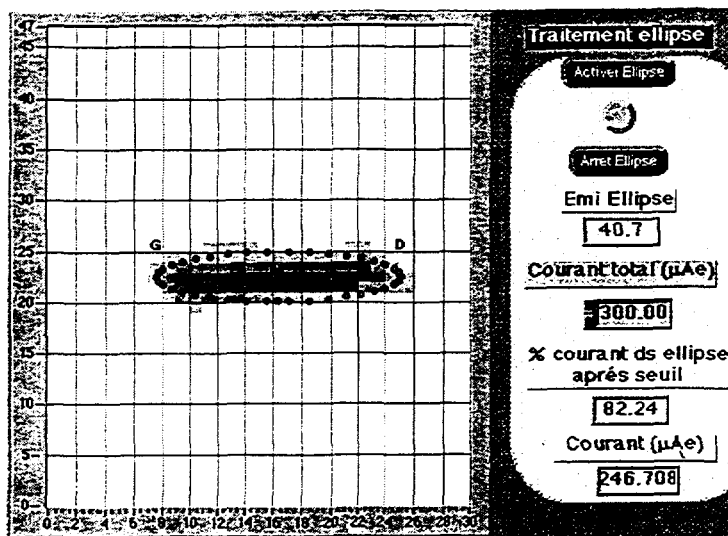
Pour réaliser cette expérience, une vanne a été réglée de façon à obtenir dans le spectre un courant d'argon donné. En conservant le même réglage de la vanne et la même pression amont de gaz SO_2 , on en déduit la fuite équivalente de SO_2 . A partir de l'analyse du spectre et de l'intensité des différents ions atomiques ou moléculaires contenant du ^{32}S , il a été possible de déduire que l'efficacité d'ionisation pour l'ion $^{32}\text{S}^{1+}$ est de 41%.

Des essais d'ionisation du fer à partir de la molécule de ferrocène, du soufre à partir de la molécule de SF_6 et du chrome évaporé à l'aide d'un four auront lieu dans les mois à venir.

Emittance

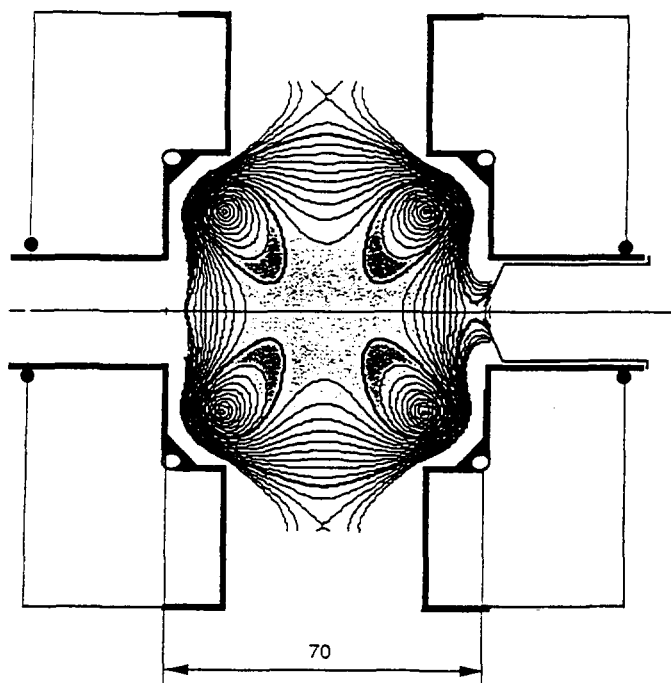
L'émission obtenue dans le cas d'un faisceau d' He^+ d'une intensité de 300 μA accéléré à 14kV est donnée ci dessous. Outre le fait que le faisceau soit de symétrie totalement cylindrique, on observe que le faisceau est quasiment

parallèle bien que les $300\mu\text{A}$ d' He^+ soient extraits au travers d'un trou de $4,5\text{mm}$ ($1,9\text{mA}/\text{cm}^2$). Le faisceau de $300\mu\text{A}$ est compris dans une émittance de $40\pi\text{mm.mrad}$.



Evolution immédiate

La source Mono 1000 est un prototype, et a pour cette raison été réalisée à partir d'une structure magnétique "d'occasion". Si le même principe magnétique est utilisé, mais que la structure magnétique est adaptée de façon à ce que le volume plasma soit important et proche du volume de la chambre, on obtient la source baptisée Mono 300, donnée sur la figure ci dessous.



Par rapport à Mono 1000, le volume externe a été réduit d'un facteur 6 alors que son volume plasma n'a été réduit que d'un facteur 1,7, son poids d'un facteur 3 et son coût d'un facteur 2 (voir tableau ci dessous). Le nombre de pièces a lui aussi été diminué, augmentant ainsi la fiabilité et la simplicité des éventuelles opérations de

démantèlement, caractéristique importante dans le cas où la source constituerait un déchet radioactif. Ces caractéristiques sont à comparer à celles d'une source Nanogan II initialement choisie pour former l'ensemble cible source. Il doit être souligné que la comparaison ci dessous n'est valable qu'en termes de déchets, car une source d'ions multichargés telle que Nanogan II ne peut être remplacée que par une source d'ions monochargés associée à une source d'ions multichargés.

	Volume de chambre (cm ³)	Volume plasma (cm ³)	Volume hors tout (litre)	Poids (kg)	Coût (kF)
Nanogan II	~250	~150	~17	~80	~250
Mono 1000	~1000	~400	~12	~25	~75
Mono 300	~300	~230	~2	~8	~40*

*coût estimé, émetteur H.F. inclus

Cette source est actuellement en cours de montage au GANIL et doit être testée courant 1999. Les caractéristiques du faisceau devraient être proches de celles de Mono 1000.

Extension du principe à une source ECR d'ions multichargés

Le principe de structure magnétique des sources Mono 1000 et Mono 300 a été étendu à une source d'ions multichargés, moyennant un renforcement du champ magnétique. Une nouvelle source baptisée GI 2000 est donc en cours de réalisation au GANIL. Le champ de fermeture calculé est de ~7000 Gauss, et le champ minimum de 0. La gamme de fréquence H.F. utilisable est de nouveau très large.

Pour de nombreuses sources ECR dont le confinement radial est réalisé à l'aide de multipôles, la forme du faisceau due aux dissymétries de champ à l'extraction conduisent à des pertes lors du transport dans les lignes de faisceau. Dans le cas de cette source, ces pertes disparaissent grâce à la symétrie cylindrique du champ magnétique.

Outre les qualités géométriques de son faisceau, cette source devrait permettre d'obtenir des intensités relativement importantes si l'on admet que le courant maximum pouvant être débité par une source ECR est fonction croissante du volume plasma, qui dans ce cas sera de ~1,5l, pour un volume de chambre de 3l.

Enfin, le poids est de ~80 kg, le volume de 17 l pour un coût estimé à 250kF.

Description de la source SUPERSHYPIE

Une modification de la source ECR4M baptisée SUPERSHYPIE a été réalisée dans le but d'augmenter l'intensité du faisceau extrait. Cette transformation a consisté à remplacer à chaque extrémité de la structure magnétique les flasques en fer doux destinées à la fermeture du champ magnétique par des couronnes d'aimants permanents dont l'orientation du champ est radiale. Le volume de la source a ainsi été augmenté de ~50%, ainsi que les performances et de façon encore plus remarquable la stabilité. Il est maintenant possible d'obtenir un spectre en état de charge pointé sur l'Ar¹²⁺ (26μA), ou une intensité de 15μA d'Ar¹⁴⁺, ou bien encore 100nA d'Ar¹⁷⁺ (intensité non mesurable dans le cas d'ECR4), cela pendant plusieurs semaines et sans aucune difficulté de réglage de la source. Il a par ailleurs été possible de régler cette source de façon à obtenir un courant d'He²⁺ (552μAe) plus important que le courant d'He⁺ (292μAe).

Outre l'amélioration des performances de cette source, la chambre a été considérablement simplifiée donc fiabilisée: elle n'est plus constituée à l'heure actuelle que d'un tube (diamètre 63mm, double peau pour la circulation de l'eau de refroidissement) et d'une flasque arrière. Le diamètre important côté injection de l'onde HF a permis de supprimer le cube d'injection de l'onde HF et son environnement, ainsi que le tube coaxial dont la température de fusion limitait la puissance qui pouvait être injectée à 1,5kW. Les alimentations en ondes HF et en gaz sont maintenant faites directement au travers d'une simple flasque fixée à l'arrière de la source.



La transformation $1+ \rightarrow n+$ pour l'accélération des ions radioactifs

N. Chauvin, T. Lamy, J.F. Bruandet, J.L. Bouly, J.C. Curdy, R. Geller,
P. Sole, P. Sortais, J.L. Vieux-Rochaz

Institut des Sciences Nucléaires. UJF-IN2P3-CNRS, 53 Av. des Martyrs 38026 GRENOBLE cedex

1 Introduction

1.1 Problématique

Des nombreuses installations de production-accélération d'ions radioactifs se développent à travers le monde et notamment en France, au GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds), avec le projet SPIRAL (Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne).

Les ions radioactifs sont produits sous forme d'ions monochargés soit à partir de réactions nucléaires induites par un faisceau primaire de haute énergie, soit par bombardement d'une cible par des neutrons. Cependant, afin d'obtenir des faisceaux de plusieurs MeV par nucléon, il convient de transformer les ions monochargés issus de la source de production en ions multichargés. Il faut donc réaliser une opération de transformation d'état de charge $1+ \rightarrow n+$, avec un double impératif de *rendement maximal* et de *temps de réponse* (durée totale de l'opération) *minimal*.

Les objectifs visés sont un *rendement en particules de quelques pour cent* et un *temps de réponse inférieur à la seconde*, compte tenu des faibles durées de vie de certains noyaux radioactifs.

L'obtention conjointe d'états de charge élevés et d'une intensité maximale du faisceau, nous ont conduits à faire le choix d'une source de type ECR (Electron Cyclotron Résonance) pour réaliser la transformation $1+ \rightarrow n+$.

1.2 Principe

Il s'agit, fondamentalement, de réaliser la capture des éléments radioactifs, injectés sous forme d'un faisceau d'ions $1+$, par le plasma d'une source ECR [1].

Une source d'ions monochargés permet de produire un faisceau d'ions $1+$ à basse énergie (environ 20 keV) simulant le faisceau d'ions radioactifs ; celui-ci est alors transporté sur quelques mètres par une ligne optique basse énergie puis est injecté dans une source ECR de type MINIMAFIOS fonctionnant à 10 GHz [2].

Les ions $1+$ sont décélérés électrostatiquement au sein de la source ECR. Après avoir franchi la barrière de potentiel du plasma, les ions incidents sont thermalisés par collisions ion-ion. Lorsque la vitesse des ions incidents est du même ordre que celle des ions du plasma ECR, ils sont alors capturés par le plasma. Ils sont ensuite multi-ionisés pas à pas par collisions successives avec les électrons du plasma. Les ions multichargés sont enfin extraits de la source ECR pour être accélérés.

1.3 Dispositif expérimental

Le faisceau d'ions monochargé est extrait à 18 keV d'une source $1+$ puis est analysé grâce à un premier spectromètre de masse. Un émittancemètre et une cage de Faraday permettent de caractériser ce faisceau $1+$. Il est ensuite transporté et injecté dans la source ECR MINIMAFIOS à travers un tube au potentiel nul de diamètre ϕ 28 mm. La source MINIMAFIOS est portée au même potentiel que la source $1+$. Cependant, une alimentation additionnelle permet de varier légèrement le potentiel de MINIMAFIOS (ΔV) afin d'optimiser la capture par le plasma ECR des ions $1+$ injectés. Le faisceau $n+$ extrait est ensuite analysé par un spectromètre de masse et son intensité est mesurée dans une cage de Faraday. Un schéma de la ligne de faisceau est représenté figure 1.

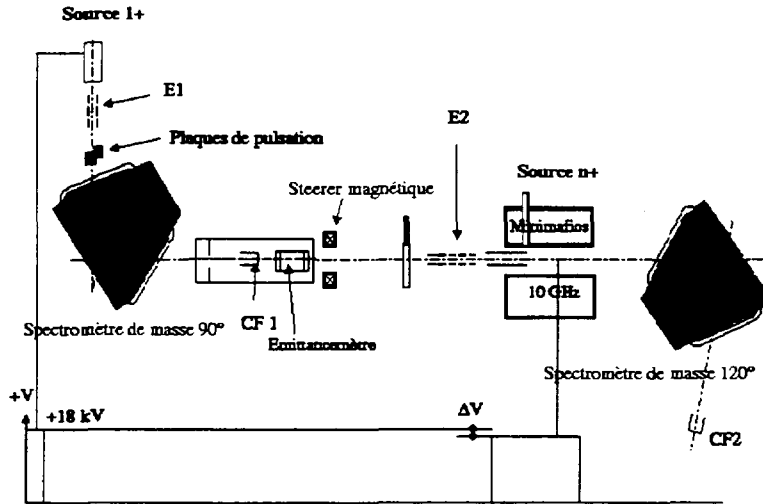


FIG. 1 - Le dispositif expérimental

2 Le mode continu

2.1 Résultats en rendement

Le rendement de transformation $1+ \rightarrow n+$ est défini par la relation :

$$\eta = \frac{1}{n} \frac{I_{n+}}{I_{1+}}$$

où I_{1+} représente l'intensité du faisceau d'ions monochargés injecté dans la source ECR et I_{n+} l'intensité du faisceau d'ions multichargés extrait.

De plus, le rendement global η_G est donné par :

$$\eta_G = \sum_{i=1}^N \eta_i$$

où η_i est le rendement pour chaque état de charge i extrait de la source ECR (pour un élément considéré) et N est l'état de charge maximal produit.

Des expériences ont été menées sur des gaz rares (krypton, argon), un alcalin (rubidium) et sur des éléments métalliques ou non (zinc, plomb, chrome, soufre) [3, 4]. Les résultats sont donnés dans le tableau 1.

Elément	Transformation $1+ \rightarrow n+$	η	η_G
^{84}Kr	$\text{Kr}^{1+} \rightarrow \text{Kr}^{11+}$	11 %	40 %
^{40}Ar	$\text{Ar}^{1+} \rightarrow \text{Ar}^{8+}$	9 %	40 %
^{85}Rb	$\text{Rb}^{1+} \rightarrow \text{Rb}^{15+}$	5.5 %	35 %
^{208}Pb	$\text{Pb}^{1+} \rightarrow \text{Pb}^{22+}$	4.5 %	35 %
^{64}Zn	$\text{Zn}^{1+} \rightarrow \text{Zn}^{9+}$	3.5 %	23 %
^{56}Cr	$\text{Cr}^{1+} \rightarrow \text{Cr}^{11+}$	3.5 %	21 %
^{32}S	$\text{S}^{1+} \rightarrow \text{S}^{7+}$	2.3 %	11 %

TAB. 1 - Rendements $1+ \rightarrow n+$ obtenus pour différents éléments.

Un spectre de répartition des états de charge du plomb (obtenu avec la source MINIMAFIOS) est donné figure 2. Dans ce cas, l'intensité du faisceau de Pb^{1+} injecté s'élève à 210 nA. On remarquera que l'état de charge extrait le plus abondant est le Pb^{22+} , ce qui est dépendant de la source $n+$ utilisée.

Dans le cas de l'argon, le rendement global vaut environ 40%, ce qui est proche du rendement obtenu si on injecte directement de l'argon gazeux dans la source ECR MINIMAFIOS [4].

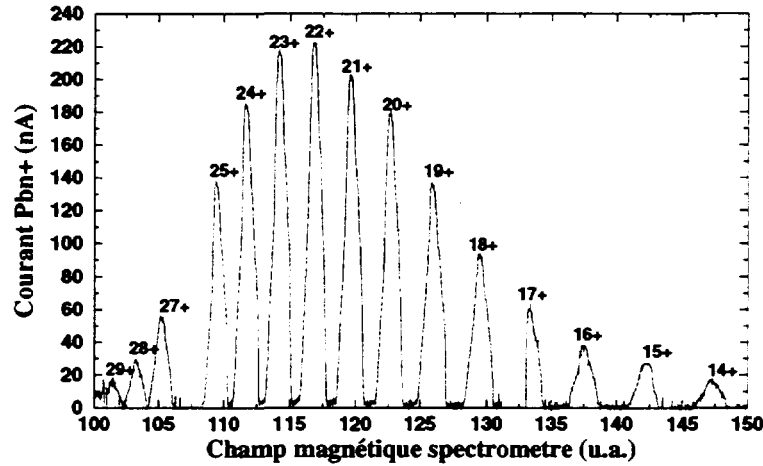


FIG. 2 - Distribution des états de charge du plomb pour un faisceau d'ions Pb^{1+} injecté de 210 nA.

Les très bons résultats obtenus pour les gaz rares s'expliquent par le fait que ces éléments ne collent pas aux parois froides. Lors du ralentissement électrostatique, les ions qui entrent en collision avec les parois de la source ECR, sont neutralisés par celles-ci mais sont aussitôt réémis pour être ensuite capturés par le plasma puis multionisés.

Au contraire, les ions issus d'éléments condensables entrant en contact avec une paroi froide y restent collés et sont définitivement perdus pour le processus. La capture par le plasma doit alors nécessairement se faire *directement*.

2.2 Temps de réponse

Pour déterminer le temps de réponse de la transformation $1+ \rightarrow n+$ il suffit d'injecter un faisceau d'ion $1+$ pulsé dans MINIMAFIOS. On obtient alors un signal $n+$ représenté figure 3 qui donne le temps de formation des ions Rb^{15+} lorsqu'on injecte un faisceau d'ions Rb^{1+} d'une intensité de 400 nA.

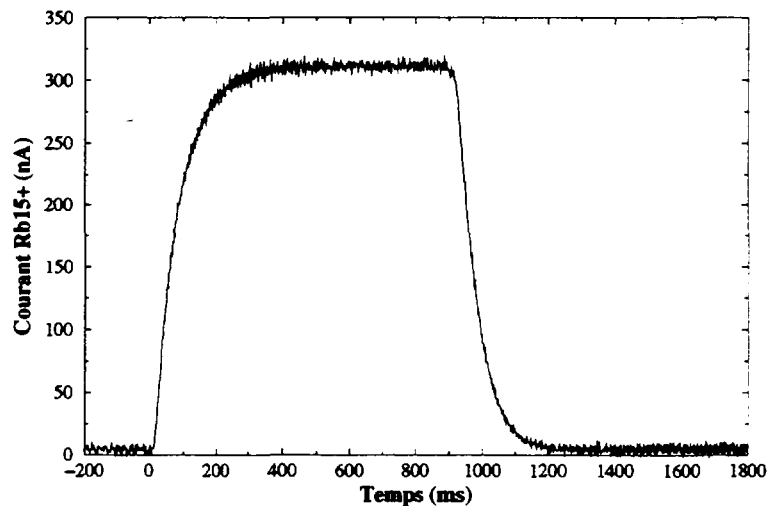


FIG. 3 - Temps de réponse de la transformation $Rb^{1+} \rightarrow Rb^{15+}$. À $t=0$ on injecte le faisceau d'ions Rb^{1+} dans MINIMAFIOS. À $t=900$ ms, on cesse d'injecter le faisceau d'ions Rb^{1+} .

On constate donc qu'après moins de 200 ms, approximativement 90% des ions Rb^{15+} sont extraits de la source ECR MINIMAFIOS.

Les temps de réponse caractéristiques de la transformation $1+ \rightarrow n+$ (quel que soit l'élément considéré) sont de l'ordre de 200 ms, ce qui est tout à fait satisfaisant devant les durées de vie des ions radioactifs (de l'ordre de la seconde) que l'on se propose de multi-ioniser et d'accélérer.

3 Le mode pulsé (mode ECRIT)

Les faisceaux d'ions radioactifs monochargés sont produits en continu notamment à cause du temps de diffusion des éléments radioactifs dans la cible de production. Il peut cependant être intéressant de disposer d'un faisceau d'ions multichargés pulsé, dans le cas d'un accélérateur secondaire fonctionnant en pulsé (i.e. : type LINAC ou synchrotron).

C'est pourquoi, en modifiant radicalement le fonctionnement de la source ECR MINIMAFIOS, nous avons développé un nouveau mode : l'ECRIT (ECR Ion Trap) [5].

On injecte un faisceau d'ions $1+$ continu; ces ions sont multionisés puis piégés dans le plasma de l'ECRIT; ils sont alors extraits brutalement en quelques dizaines de millisecondes par coupure de l'onde hyper-fréquence 10 GHz (mode afterglow [6]).

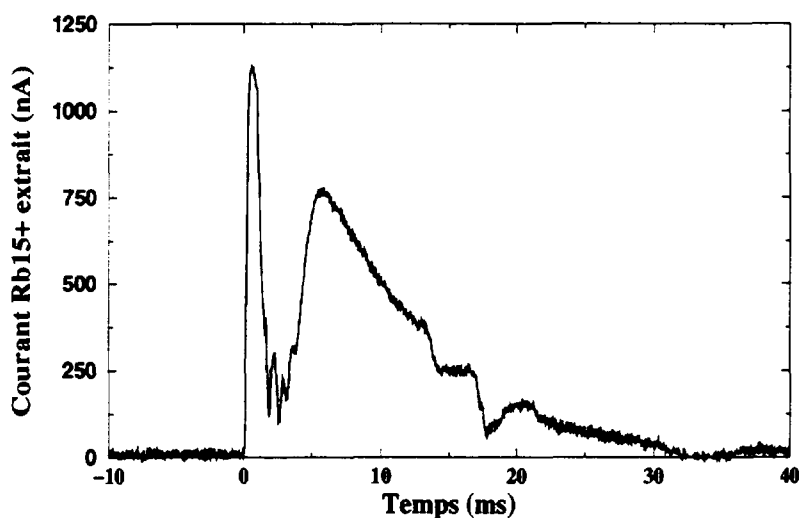


FIG. 4 - Structure en temps des ions Rb^{15+} mesurés. A $t=0$, on extrait les ions par coupure de l'onde H.F.

Ces études n'ont été réalisées, pour l'instant, qu'avec l'élément rubidium. Nous avons obtenu un rendement de transformation $Rb^{1+} \rightarrow Rb^{15+}$ en mode pulsé de 2.2%. Le «pulse» d'ions Rb^{15+} extrait a une durée d'environ 20 ms (voir figure 4).

On peut noter que si l'on injecte un faisceau de Rb^{15+} d'intensité 400 nA pendant 1 seconde dans l'ECRIT, on mesure un courant-pic extrait de Rb^{15+} valant 11.5 μA , ce qui représente 2.4×10^{10} ions dans un «pulse» de 20 ms. Considérant l'ensemble des états de charges présents dans le plasma, on évalue à plus de 10^{11} le nombre de particules stockées dans l'ECRIT.

Par ailleurs, le temps de confinement des ions Rb^{15+} dans le plasma de l'ECRIT a pu être mesuré : il est de l'ordre de 500 ms.

4 Mesures d'émittance du faisceau $1+$ injecté.

4.1 Rendements et émittances

L'émittance de différents faisceaux et leurs rendements $1+ \rightarrow n+$ associés ont été mesurés au cours des dernières expériences réalisées dans le cadre d'une collaboration avec le GANIL [7]. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 2. La mesure d'émittance donnée est celle de l'émittance horizontale du faisceau d'ions $1+$, la valeur de l'émittance verticale étant tout à fait comparable.

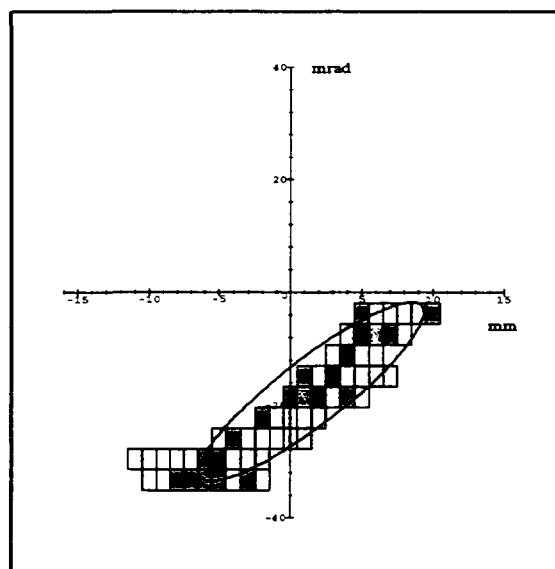
Ion injecté	Intensité(nA)	Émittance (mm.mrad)	η
Ar ¹⁺	1600	20π	8.7%
Pb ¹⁺	380	40π	2.7%
Pb ¹⁺	170	5π	4.8%
Cr ¹⁺	210	40π	0.7%
Cr ¹⁺	100	22π	1.5%
Cr ¹⁺	32	10π	2.9%
Cr ¹⁺	13	6π	3.5%

TAB. 2 - Émittance et rendement $1+ \rightarrow n+$ pour différents faisceaux $1+$ injectés.

On constate que des faisceaux de faible émittance permettent un meilleur rendement. Cette limitation est essentiellement due aux caractéristiques optiques de notre dispositif expérimental. En particulier, l'acceptance de la source MINIMAFIOS n'a pas été optimisée.

4.2 Nouveaux résultats : le soufre

La figure 5 représente l'émittance horizontale d'un faisceau d'ions S^{1+} à 18 keV et d'intensité 800 nA.



Emittance Horizontale

- Émittance géométrique pour 87% du faisceau :
 48π mm.mrad.
- Émittance RMS à deux écart-type :
 77π mm.mrad.
- Aire de l'ellipse contenant 85% du faisceau :
 57π mm.mrad.

FIG. 5 - Émittance horizontale d'un faisceau de S^{1+} à 18KeV

Avec un faisceau possédant ces caractéristiques, on obtient un rendement de transformation $S^{1+} \rightarrow S^{7+}$ de 2.3% et un rendement global $\eta_G = 11\%$.

5 Perspectives et développements

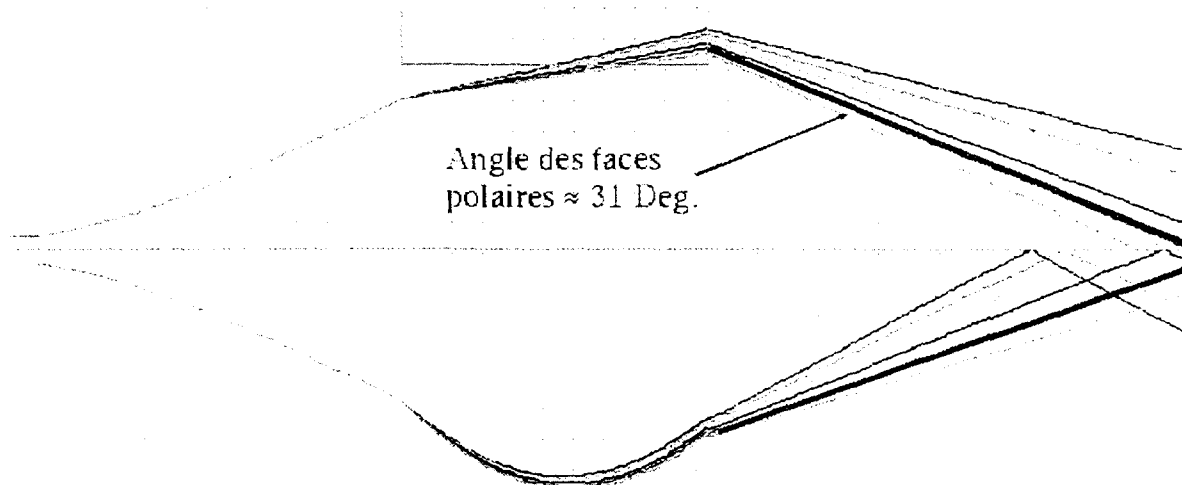
Du fait des résultats expérimentaux obtenus avec la méthode $1+ \rightarrow n+$, un grand intérêt est exprimé par les concepteurs des accélérateurs d'ions radioactifs. Les expériences qui ont permis d'établir les résultats précédemment présentés ont mis en évidence les limitations de notre dispositif expérimental, à savoir :

- un défaut de focalisation dans le plan vertical du spectromètre 90° .
- les limitations dues à la source MINIMAFIOS qui date de 1981.
- une méconnaissance de l'optique de faisceau permettant la capture des ions $1+$ la plus efficace.

Afin de progresser dans la fiabilité, la souplesse, et la caractérisation de la méthode nous allons dès maintenant intervenir sur ces trois sujets.

5.1 Focalisation du spectromètre 90° (sélection $1+$).

La modification de l'angle des faces polaires de 18 à 31 degrés va permettre de corriger la focalisation verticale du spectromètre. Un exemple de calcul effectué avec TRANSPORT est représenté Fig. 6.



Calcul de l'angle des pôles de l'aimant à 90° .
Programme transport.

Fig. 6 - Impact de la correction de l'angle des faces polaires sur le chromatisme du spectromètre.

5.2 Réponse aux limitations de la source MINIMAFIOS : la source PHOENIX.

La source MINIMAFIOS prêtée par le CEA-Grenoble et datant de 1981 représente une importante limitation à nos études. Ces limitations sont : des problèmes de maintenance, un pompage insuffisant nous contraignant à des interventions limitées dans le cadre de la R&D, une isolation H.T. limitée à 20 kV, un champ magnétique limitatif en intensité et en variabilité, une mécanique d'injection non spécifique et donc une acceptation limitée des faisceaux d'ions $1+$. Pour toutes ces raisons, nous construisons la source PHOENIX (version booster) représentée Fig. 7. Cette nouvelle source E.C.R. présentera les avantages suivants : une grande acceptation et une mécanique adaptée à la R&D, un hexapole facilement modifiable en octupole, une isolation H.T. performante pouvant atteindre 60 kV dans le futur, la modularité de son champ axial comme démontré par les résultats de calcul présentés Fig. 8. , un gradient de champ central réglable.

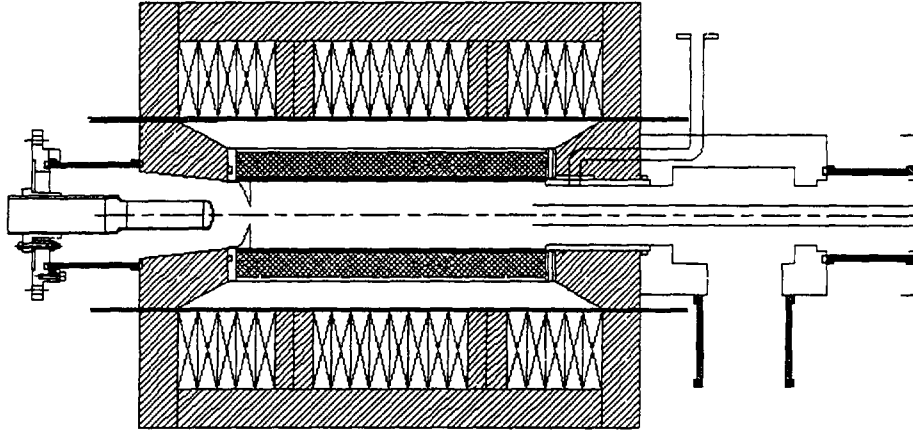


Fig. 7 - Source PHOENIX BOOSTER.

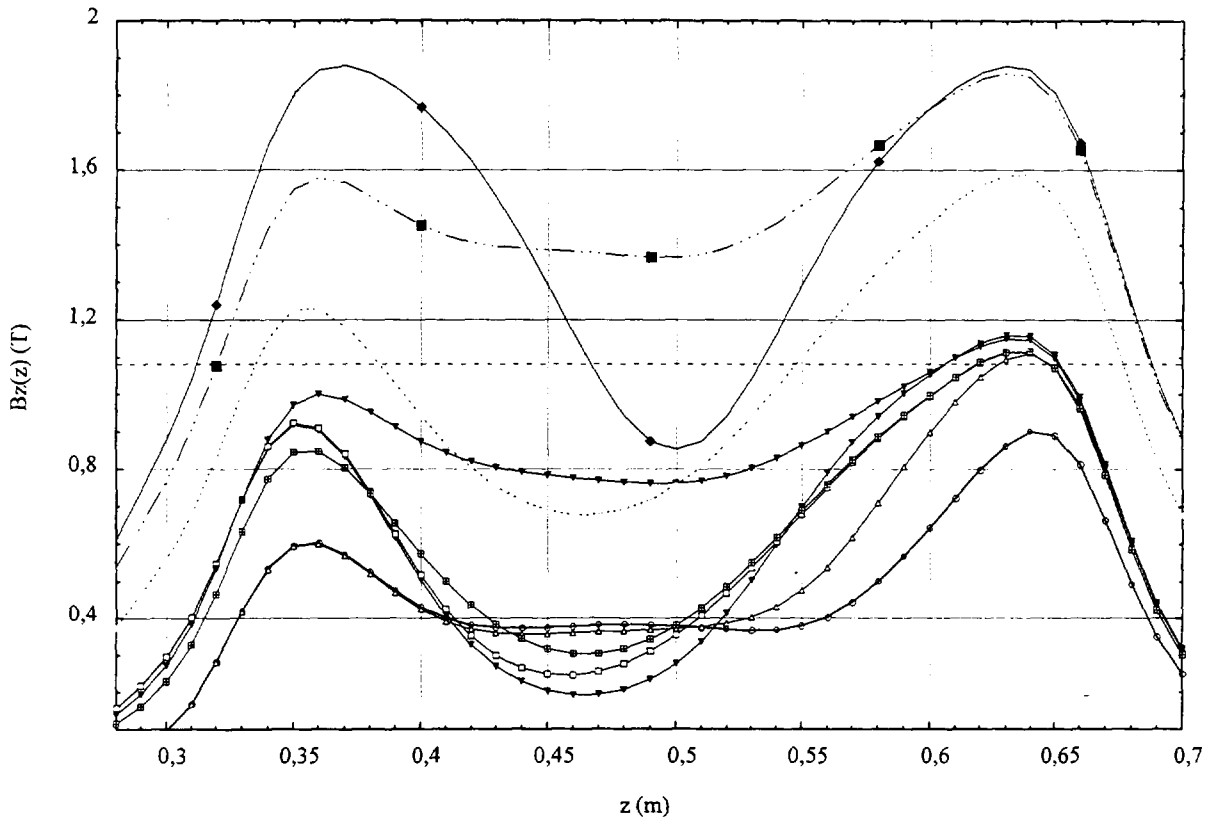


Fig. 8 - Inductions magnétiques axiales $B_z(z)$ réalisables avec la Source PHOENIX.

5.3 Optique de ligne

Les gaz rares présentant un rendement $1+ \rightarrow n+$ expérimental quasiment équivalent à l'efficacité de MINIMAFIOS en mode injection de gaz standard, il semble possible d'améliorer les résultats obtenus pour les ions métalliques en limitant au maximum les trajectoires ioniques menant aux parois. Pour cela, il est essentiel tout d'abord de connaître les conditions optiques qui ont permis d'obtenir les résultats établis jusqu'alors, pour ensuite, grâce à une méthode de calcul validée, calculer une optique de ligne permettant d'optimiser la capture directe du faisceau incident.

Références

- [1] J.-L. BELMONT ET AL. – The PIAFE projet at Grenoble. In : *Proceedings of the International Workshop on the Physics and Techniques of Secondary Nuclear Beam*, éd. par B. Fernandez J.F.Bruandet et M.Bex. (Editions Frontières). – Dourdan, mars 1992.
- [2] C. TAMBURELLA. – *Projet P.I.A.F.E. : Production d'Etats de Charges Elevées pour des Ions Radioactifs*. – Thèse de Doctorat, Université Denis Diderot Paris VII, 1996.
- [3] T.LAMY ET AL. – Ion Charge Increase $1+ \rightarrow n+$ for the acceleration of alkali and metallic radioactive ions. In : *Proceedings of the EPAC 98*. – Stockholm, juin 1998.
- [4] T. LAMY ET AL. – Production of multicharged radioactive ion beams: New results for the $1+ \rightarrow n+$ method with the MINIMAFIOS and SARA-CAPRICE electron cyclotron resonance ion sources. *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 69, n° 3, mars 1998, pp. 1322–1326.
- [5] N. CHAUVIN ET AL. – Electron cyclotron resonance ion trap, a multicharged ion breeder/buncher. *Nucl. Instrum. Methods A*, vol. 419, n° 1, 1998, pp. 185–188.
- [6] P.SORTAIS. – Pulsed ECR ion source using the afterglow mode. *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 63, n° 4, avril 1992, pp. 2801–2085.
- [7] T.LAMY ET AL. – *Rapport d'étape sur les mesures de rendements de transformation $1+ \rightarrow n+$* . – Rapport Interne ISN n° 98.99, Institut des Sciences Nucléaires, novembre 1998.



Projet de source d'ions sélective en ligne pour produits de fission.

Robert MEUNIER

CSNSM - IN2P3 - CNRS - Bât. 104/108 Campus - 91405 ORSAY.

meunier@csnsm.in2p3.fr

Objectifs du projet.

Ce projet de source s'inscrit dans le projet plus vaste du FLNR (JINR) de production de faisceaux d'ions radioactifs à partir de la réaction $^{238}\text{U}(\gamma, f)$.

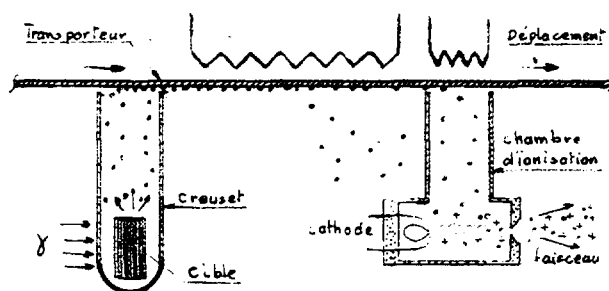


Figure 1. Schéma de principe du dispositif proposé pour la réalisation d'une source sélective. Les éléments sont sélectionnés en utilisant les écarts entre les pressions de vapeur.

Une des difficultés présentées par ce type de production par fission est que la séparation des isobares produits simultanément, n'est possible efficacement que pour quelques types particuliers d'éléments : gaz rares, alcalins, halogènes. Pour les alcalins et les halogènes on utilise leur grande sensibilité à l'ionisation de surface. Pour les gaz rares, leur très grande volatilité liée à leur absence de réactivité permet de les séparer sans peine des autres éléments.

Principe et hypothèses de base.

Le dispositif proposé va un peu plus loin dans ce sens en cherchant cette fois à favoriser les éléments à moyenne ou faible volatilité. Ce dispositif s'intercalerait entre deux organes : le **creuset** contenant la cible où sont créés les nucléides recherchés et la **chambre d'ionisation** à partir de laquelle le faisceau prend naissance (Figure 1). Son rôle va être d'assurer un transport sélectif des nucléides entre ces deux organes. Il utilisera la différence de volatilité des éléments pour parvenir à la sélectivité souhaitée.

Pour faire la démonstration théorique de la pertinence du procédé, un calcul a été fait en choisissant un nucléide à sélectionner, le ^{132}Sn très intéressant par son caractère particulier de noyau doublement magique. La Figure 2 montre la prévision de répartition de la production de nucléides à cette masse et la Figure 3 la pression de vapeur des principaux éléments concernés. Nota : la période du ^{132}Sn est de 49 s.

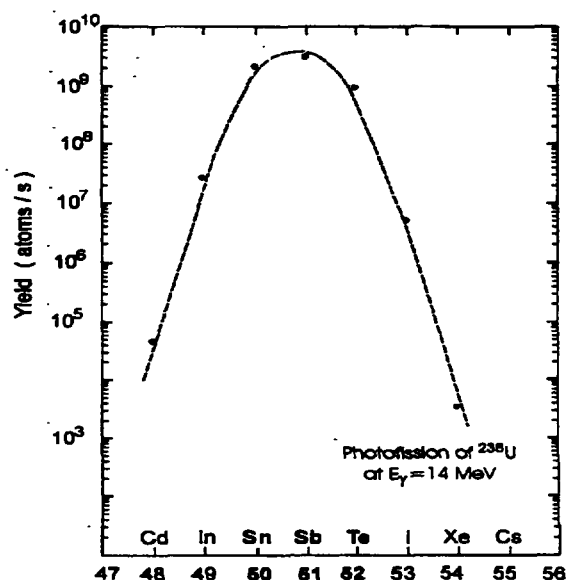


Figure 2. Taux de production prévus des isobares à 132 uma.

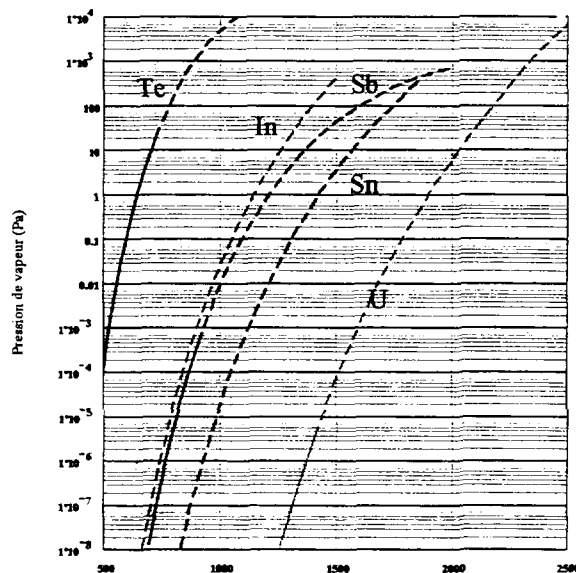


Figure 3. Pression de vapeur des isobares de 132 uma en fonction de la température (K).

pression de vapeur en fonction de la température, de calculer un taux d'évaporation des atomes de surface. D'un point de vue probabiliste, ce taux joue un rôle similaire à celui de la constante de désintégration de noyaux radioactifs : c'est la probabilité pour un atome de surface de s'évaporer à une température donnée. Le résultat du calcul de ces taux est donné par la Figure 4 pour l'étain et l'antimoine.

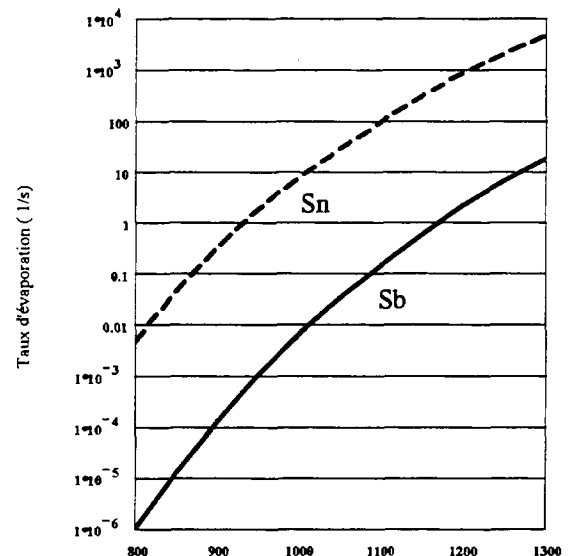


Figure 4. Taux d'évaporation de l'étain et de l'antimoine en fonction de la température en K.

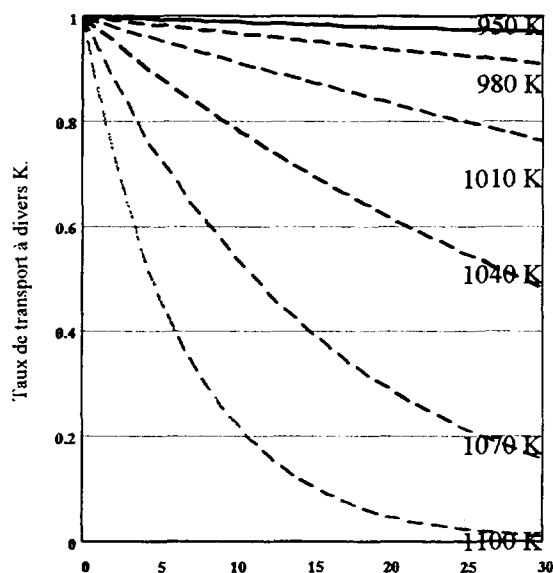


Figure 5. Efficacité du transport de l'étain selon la durée en secondes à diverses températures.

Il y apparaît clairement que le ^{132}Sb a les caractéristiques les plus voisines du ^{132}Sn tant en ce qui concerne la volatilité que le flux produit. Il sera donc le plus difficile à éliminer par le moyen choisi. Cd, I, Xe et Cs ont une volatilité très élevée et ne sont donc pas une difficulté dans le cas présent.

Pour la suite des calculs et bien qu'elle soit critiquable, on fera l'hypothèse que la volatilité des atomes isolément déposés sur le transporteur est identique à celle des atomes à la surface de la matière massive. Cette hypothèse doit être sans doute d'autant mieux vérifiée que le couple transporteur - transporté a peu d'affinités et que la température sera élevée facilitant la désorption et la décomposition moléculaire.

Il est possible, en partant de la connaissance de la

Faisabilité théorique.

Partant des données précédentes il est possible de calculer et de comparer l'évaporation de l'étain et le l'antimoine une fois condensés sur le transporteur et ceci à diverses températures (Figure 5). On y voit que la perte d'étain est acceptable jusqu'à une température d'environ 1000 K.

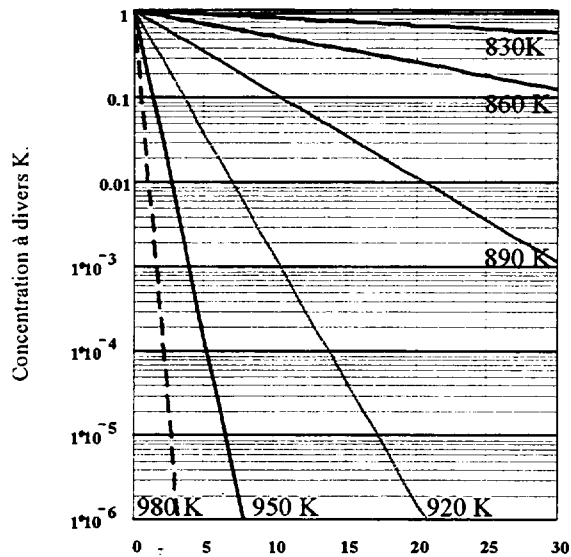


Figure 7. Concentration relative de l'antimoine sur le transporteur en fonction du temps en secondes, à diverses températures.

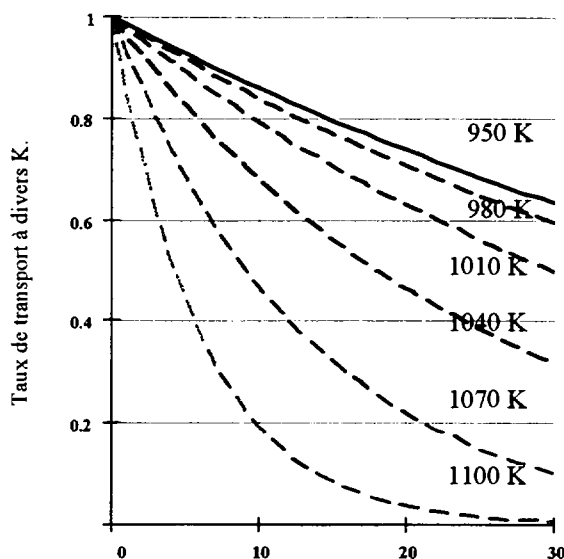


Figure 8. Taux résiduel de ^{132}Sn sur le transporteur en fonction du temps (en secondes) pour diverses températures.

localement un gaz réactif, est aussi envisageable.

La Figure 7 montre que l'élimination de l'antimoine devient intéressante pour des températures supérieures à 920 K. Il est alors possible de répondre positivement sur la pertinence de la méthode de sélection proposée. Toutefois, la difficulté à laquelle il faudra faire face sera le contrôle relativement précis de la température du transporteur puisque la bonne marge de température se situe entre 900 et 1000 K.

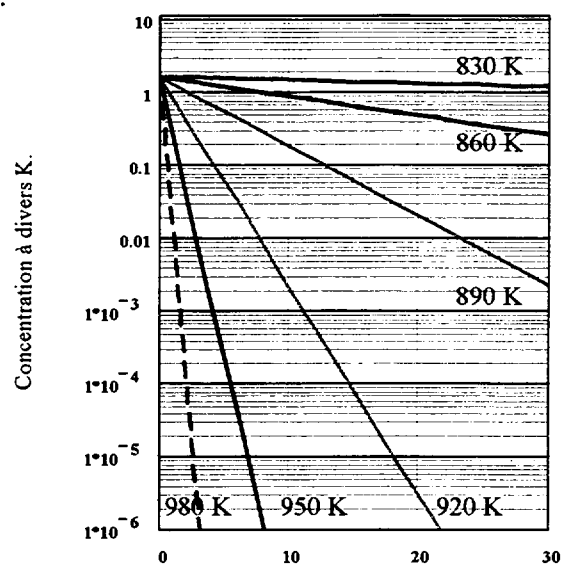


Figure 6. Evolution de la concentration du $^{132}\text{Sb}/^{132}\text{Sn}$ en fonction du temps (en secondes) à diverses températures.

La nature radioactive des nucléides ajoute une contrainte temporelle supplémentaire illustrée pour le cas présent par la Figure 8 et la Figure 6. La durée de la phase de sélection doit être adaptée à la période du nucléide recherché.

Le relâchement des étains dans la chambre d'ionisation par le transporteur doit avoir une bonne efficacité dans un temps relativement court. La méthode choisie peut être d'élever localement la température du transporteur. Une autre méthode consistant à injecter

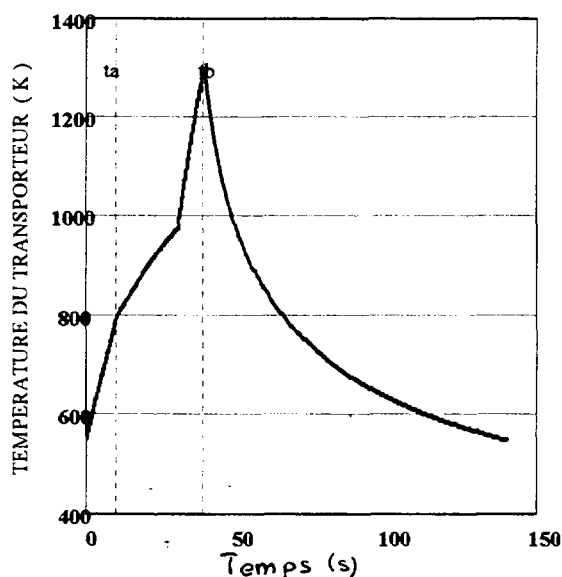


Figure 9. Cycle thermique complet du transporteur. On distingue les quatre phases du cycle : Capture des atomes, sélection du Sn, relâchement du Sn et refroidissement.

Préprojet pratique.

Le jeu va maintenant consister à trouver une solution pratique avec un compromis acceptable entre les multiples paramètres thermiques, géométriques et temporels, sans oublier le choix des matériaux alliant la compatibilité chimique et thermique.

Une solution possible a été trouvée à l'aide d'une modélisation avec un logiciel mathématique courant, appliquée à notre exemple.

Le transporteur est constitué par un anneau plan tournant autour de son axe. L'une des faces de cet anneau reçoit le dépôt à purifier et à transporter. L'autre face est utilisée pour les échanges thermiques nécessaires au contrôle de sa température selon le cycle choisi représenté par la Figure 9. Ce cycle se termine par une phase de refroidissement pour redonner au transporteur sa capacité de capture des atomes produits par fission.

L'évolution des phases de capture des atomes, puis de sélection et enfin de restitution, sont illustrées par la Figure 10 et la Figure 11.

Le graphite a été choisi comme matériau pour le disque à cause de sa relativement grande inertie chimique et de ses qualités mécaniques à haute température. Si l'on fixe à 20 mm les ouvertures du creuset et de la chambre d'ionisation, le rayon moyen de l'anneau ferait 47 mm, sa largeur 25 mm et son épaisseur 2 mm. Sa vitesse de rotation serait de 1 tour en 140 secondes. L'espacement d'axe en axe des ouvertures du creuset et de la chambre d'ionisation serait de 60 mm.

Mécaniquement, la chose ne présente pas de difficulté.

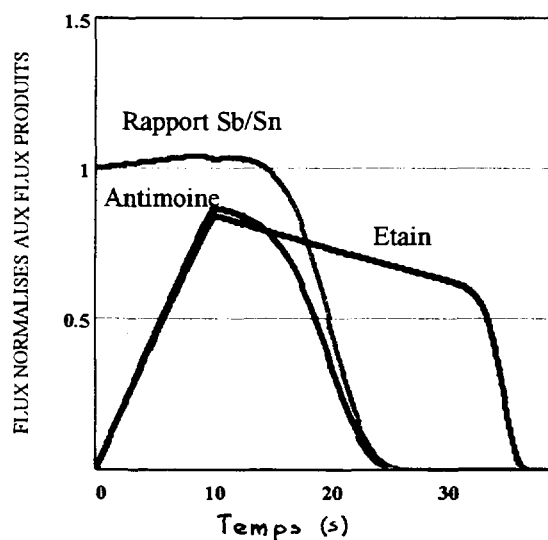


Figure 10. Evolution comparée des flux de ^{132}Sn et de ^{132}Sb captés par le transporteur au cours du cycle, rapportés aux flux produits.

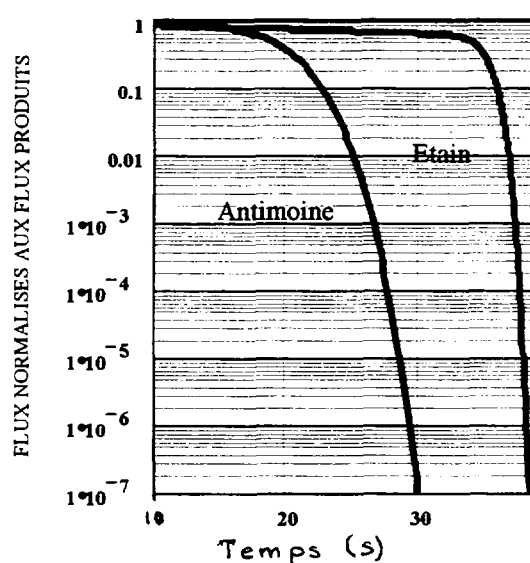


Figure 11. Evolution comparée des flux de ^{132}Sn et de ^{132}Sb captés par le transporteur au cours du cycle, rapportés aux flux produits.



INSTITUT D'ELECTRONIQUE FONDAMENTALE (UMR 8622)
UNIVERSITE DE PARIS-SUD F-91405 ORSAY CEDEX

J. Aubert, A. Chabrier, C. Schwebel, Ph. Coste, C. Fusellier, C. Macé, L. Wartski

SOURCE MICROONDE MULTIANTENNE POUR LE TRAITEMENT DES MATERIAUX

L'objectif de l'étude est la réalisation d'un canon à ions à faisceau large et homogène pour le traitement de surface. La figure 1 donne quelques exemples de procédés et les zones des énergies ioniques nécessaires. Dans le cadre d'une étude précédente, nous avons mis au point un canon à excitation microonde dont le diamètre du faisceau, à l'émergence, est de 50mm. Sa structure est composée d'une chambre à ionisation cylindrique et d'une antenne microonde centrale. Des aimants permanents, à l'extérieur de la chambre, permettent de bénéficier de l'effet de résonance cyclotronique des électrons (effet RCE).

Afin d'accroître sensiblement le diamètre du faisceau (150 mm de diamètre), une structure multiantenne équipée d'aimants permanents dans chacune des antennes a été développée (fig. 2). Le rôle des aimants externes est un confinement multi-cusp classique du plasma et celui des aimants internes est de produire des zones RCE en volume.

L'optimisation de la structure a conduit au choix des différentes dimensions ainsi qu'à celui du nombre et de la position des antennes. Pour ce faire nous avons mesuré la distribution pour plusieurs géométries et nous avons comparé avec les modes susceptibles d'être présents dans la chambre d'ionisation. Le mode TM₀₂₀ a été clairement identifié (fig. 3). Les simulations à l'aide du logiciel HFSS confirment cette hypothèse. Les simulations magnétiques ont permis de déterminer avec précision les positions optimales des aimants permanents (fig. 4).

Le plasma a été caractérisé à l'aide d'une sonde électrostatique mobile et d'une fibre optique également mobile permettant l'analyse spectroscopique d'émission sur un diamètre. Enfin, un collecteur mesure la distribution radiale du faisceau à l'émergence (fig. 5). Une simulation numérique de l'évolution du profil du faisceau permet de déterminer la distance optimale canon-cible (fig. 6).

La figure 7 montre les courants extraits en fonction de la puissance microonde pour deux pressions de fonctionnement.

En conclusion, on donne ci-dessous les caractéristiques principales du canon pour un utilisateur :

- densité du courant de 1mA/cm² à 500W et 1000 V;
- faisceau homogène à 5 % sur un diamètre de 100 mm;
- utilisation de tous les gaz réactifs;
- durée de vie très élevée liée seulement à l'usure des grilles.

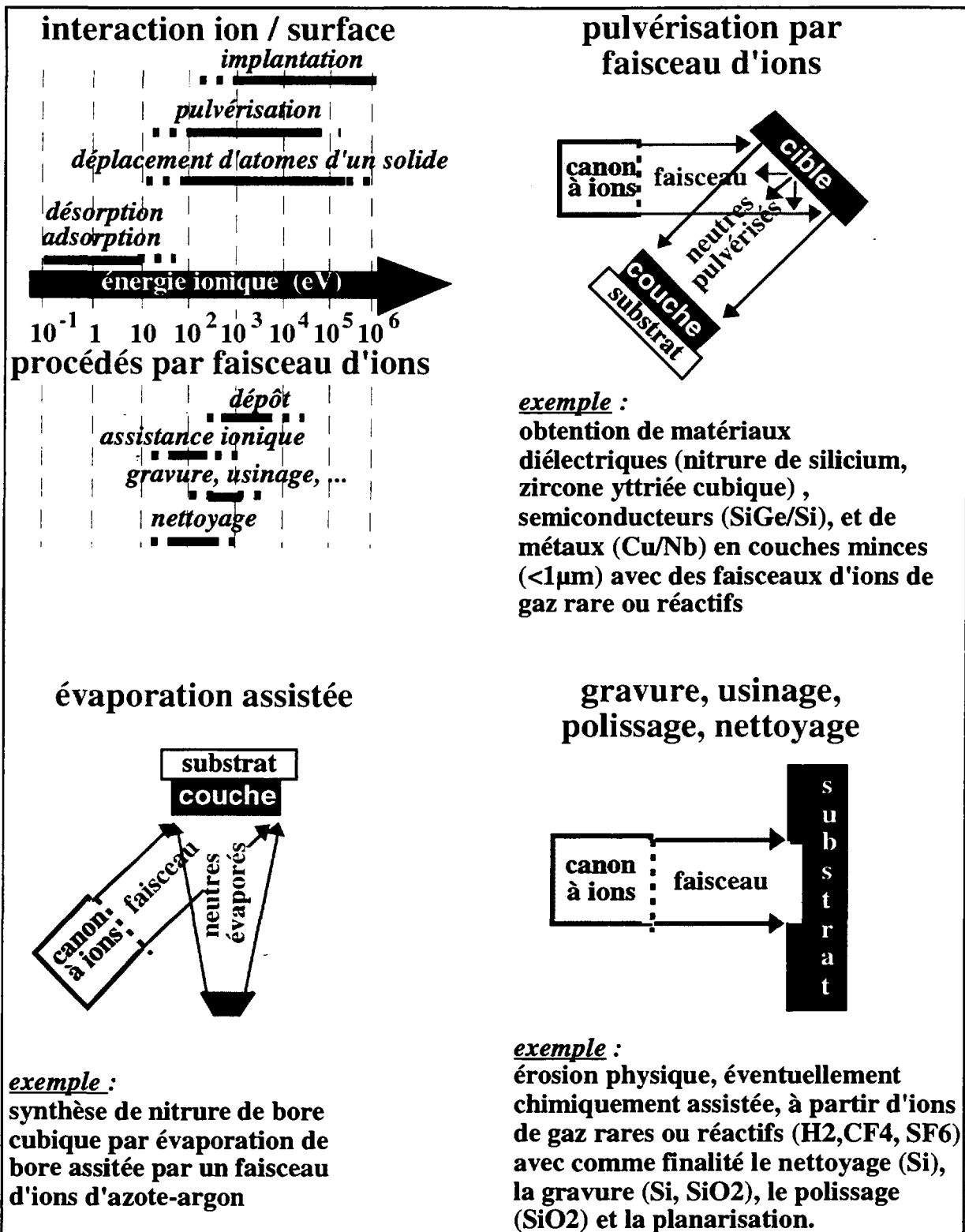


Fig. 1 : procédés utilisant des faisceaux d'ions.

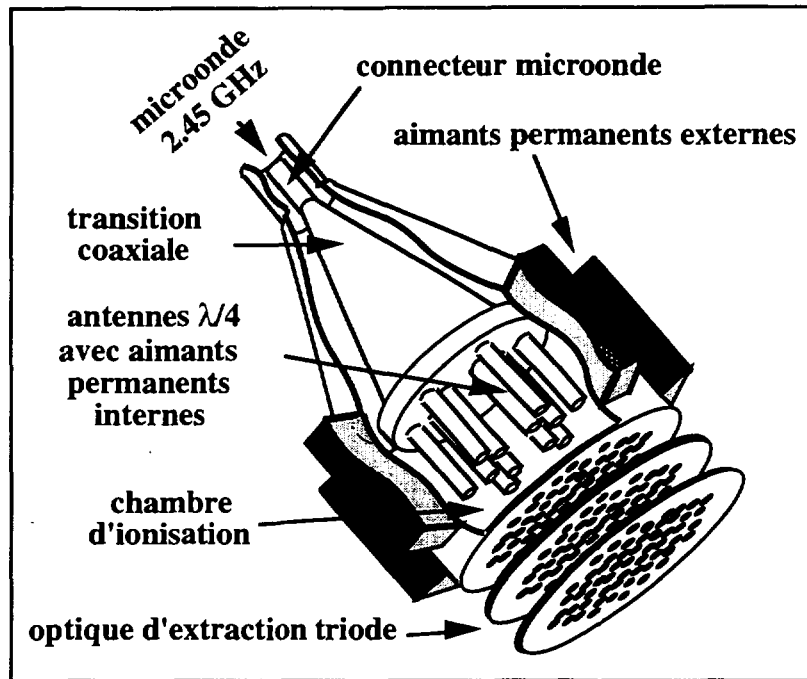


Fig. 2 : vue 3D de principe de la structure étudiée.

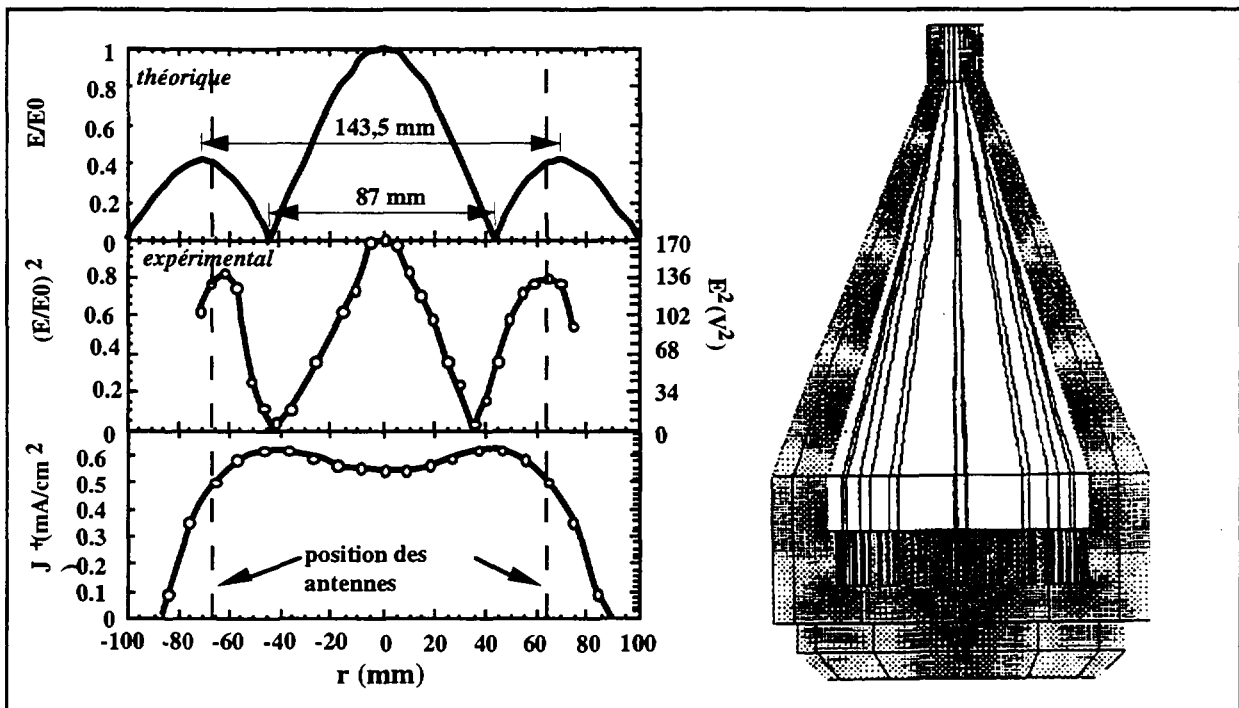


Fig. 3 : mesures et simulation du champ électromagnétique dans la source.
Conditions expérimentales : $P_i = 300W$, Pression argon = 10^{-3} mbar, polarisation source (V_s) = 500V, polarisation accélératrice (V_a) = -200V.

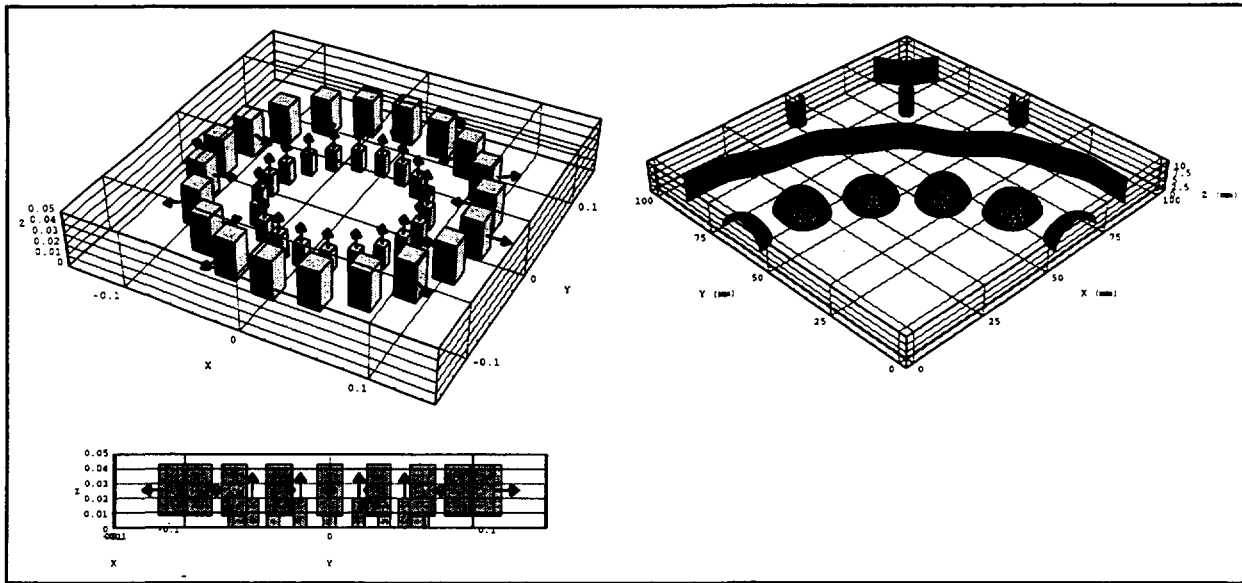


Fig. 4 : étude de la répartition spatiale de la surface 875 Gauss de 0 à 10 mm du nez des antennes par simulation du champ magnétostatique : 20 aimants externes SmCo rectangulaires de 35x20x15 mm répartis sur un diamètre de 200 mm en aimantation alternée et 20 aimants SmCo cylindriques internes répartis sur un diamètre de 130 mm et aimantés vers les grilles.

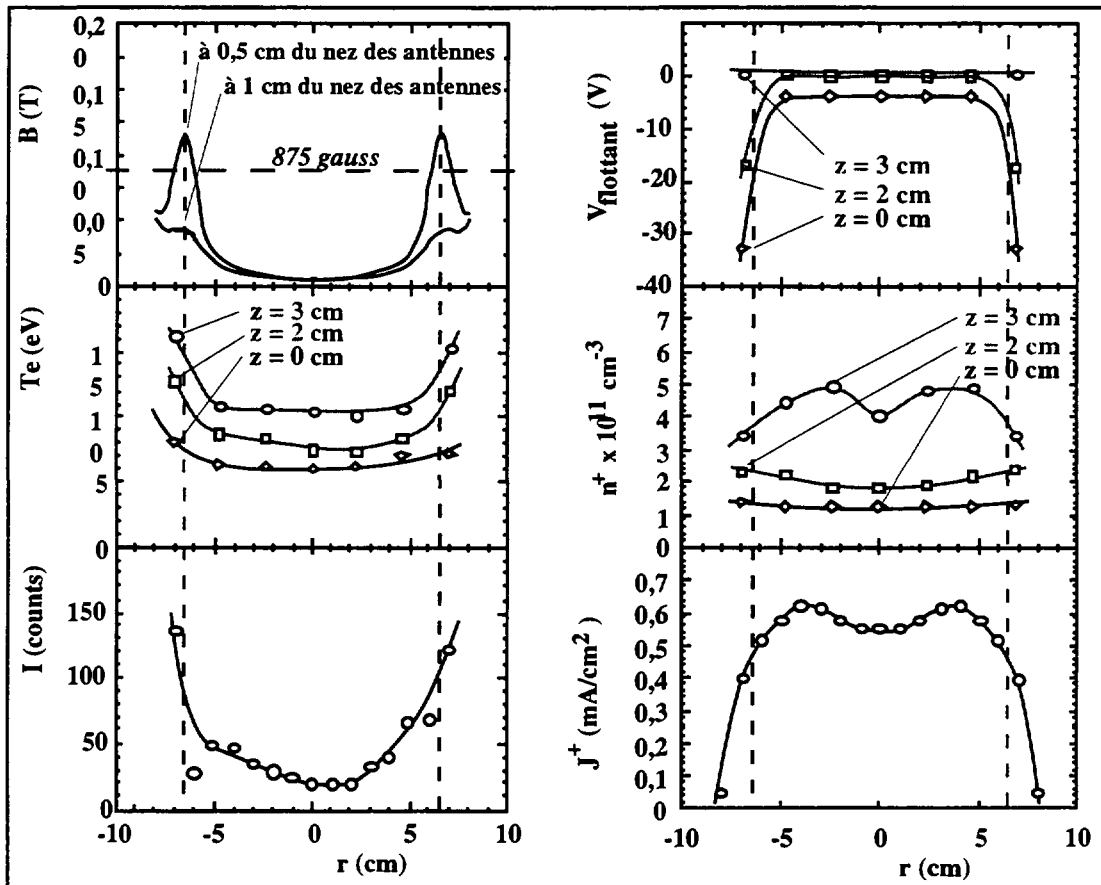


Fig. 5 : caractérisation du plasma par mesure de sonde électrostatique, analyse spectroscopique d'émission et profilométrie du faisceau d'ions.

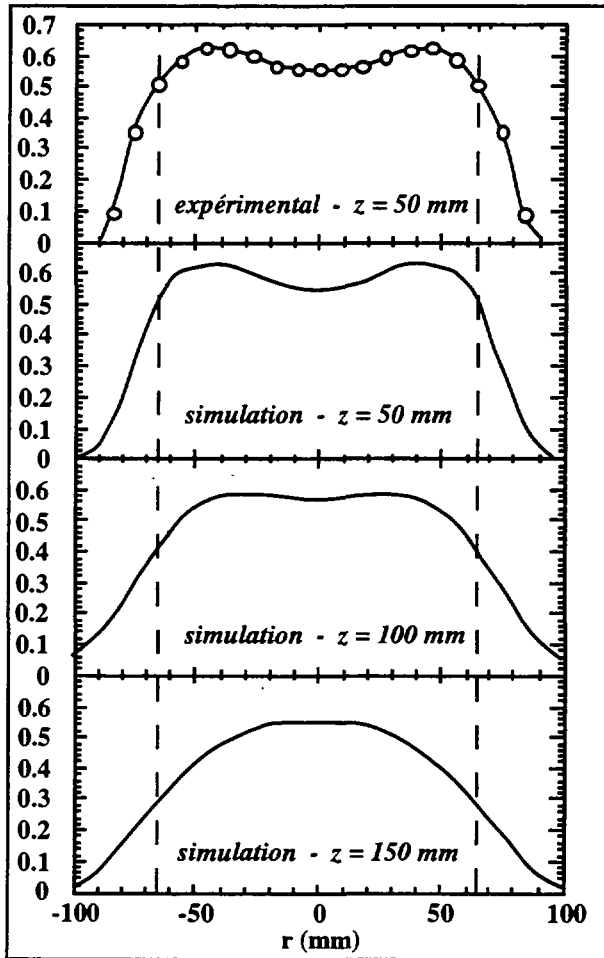


Fig.6 : simulation numérique de l'évolution du profil du faisceau d'ions en fonction de l'éloignement de la cible. $P_i=300$ W, pression argon= 10^{-3} mbar, $V_s=500$ V, $V_a=-200$ V

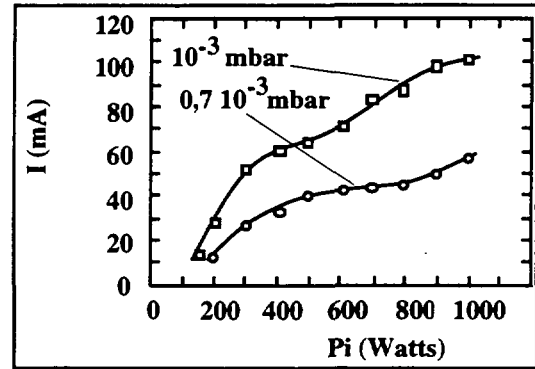


Fig. 7 : caractérisation du courant extrait en fonction de la puissance microonde injectée. $V_s=500$ V, $V_a=-200$ V.



Advanced implantation systems and development of general purpose unlimited lifetime ECRIS for application on implantation devices

C. Bieth¹, J.L. Bouly², J.C. Curdy², S. Kantas¹,
P. Sortais², P. Sole², J.L. Vieux-Rochaz²

¹Pantechnik s.a.

CAEN, 14000, FRANCE

²Institut des Sciences Nucléaires, CNRS-IN2P3 / Univ. J. Fourier

GRENOBLE, 38026 GRENOBLE CEDEX, FRANCE

e-mail : sortais@isnhp7.in3p3.fr

Abstract - ECR ion sources were originally developed for high energy physics applications. They are used as injectors on linear accelerators and cyclotrons to further elevate the particle energy via high charge state ions. This technique is well suited for sources placed on a high voltage platform where AC power available is limited by isolated transformers. The PANTECHNIKS family of ion sources with its wide range of ion beams (various charge states with various beam currents) offers new possibilities and perspectives in the field of ion implantation. In addition to all these possibilities, PANTECHNIK ion sources have many other advantages like: a very long life time without maintenance expense, good stability, efficiency of ionisation close to 100% (this improves the life time of the pumping system and other equipment), the possibility to produce ion beams with different energies and a very good reproducibility. A new MeV ion accelerator was jointly developed by SPECTRUM SCIENCE an American firm and PANTECHNIK, using an ECR ion source. Ar¹¹⁺ ions are produced on a 200 kV platform.

I - INTRODUCTION

In parallel with the development of very high performance devices, corresponding to long term studies with a heavy technology (high power or super conducting devices) we observe a growing demand for the use of ECRIS with medium performances in special environments, like high voltage platforms [1], Van de Graaf terminals [2]. In order to get an operational production system of multicharged ions [3], we focus our effort on the development of cheap and reliable ECRIS for medium current multicharged ions or high current of low or monocharged ions.

II - NANOGAN 10 GHz

A. Structure and power consumption

The ultra compact ECRIS, NANOGANTM has been developed at GANIL in order to be used as a high gas efficiency ioniser for low lifetime gaseous radioisotopes [4]. The body of the source is reduced to a simple cylinder of 130 mm in diameter and 220 mm in length.

The ECR3-like magnetic structure is made of 5 slices of FeNdB permanent magnets. This field defines the minimum |B| magnetic structure inside a Ø 26 mm plasma chamber. Around this plasma chamber a multipolar permanent magnet defines the radial field.

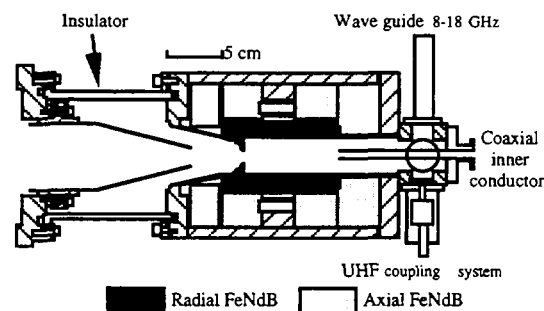


Figure 1 : Schematic view of the NANOGANTM
10 GHz ion source

The UHF coupling is made through a rectangular to coaxial wave guide transition where the inner conductor is a Ø 6-8 mm copper tube (fig. 1). The extraction system is made of a simple mono electrode coupled to an Einzel lens.

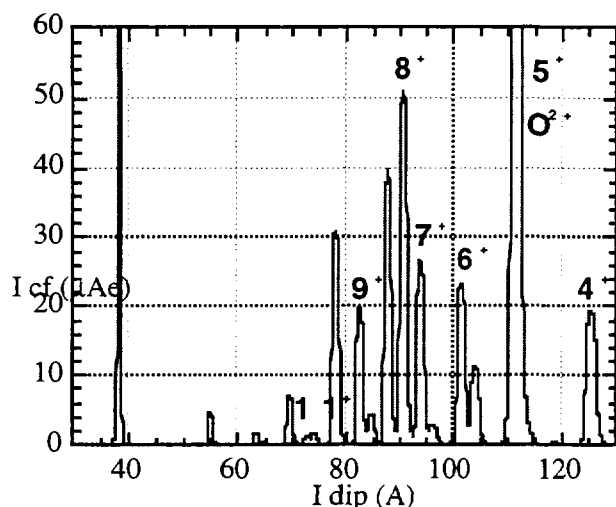


Figure 2 : NANOGAN™ 10.0 GHz : Ar spectrum produced with 50 W

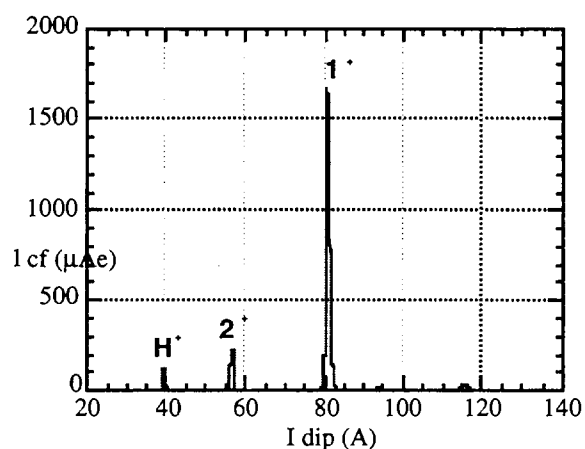


Figure 3: NANOGAN™ 10.0 GHz : He spectrum produced with 20 W

B. Multicharged ions production

It is now possible to produce all the spectra of Ar charges inside a Ø 26 mm plasma chamber and for a total installed electrical power lower than 100 W. We can observe that a maximum current of 65 μAe of Ar^{8+} is obtained with 60 W / 10 GHz (fig. 2) and up to 10 μAe with only 1 W (fig. 3). Optimisation for low charge state operation is also possible and generally very low power consumption down to some W is enough to extract 1 mAe of monocharged ions (1.7 mA of He^+ with 20 W (fig. 3), depending strongly on the extraction system) or to maintain the production of O^{6+} corresponding probably to some nAe of O^{8+} .

By reducing the dimensions of the source we have shown that the volume of the plasma is not a critical parameter for the source performances. The most important technological aspect is the reduction of the UHF power level down to some W for the production of multicharged ions (fig. 5). This means that we can drive ECRIS with new transmitters like solid state or TWT so as to simplify the installation of multicharged ECRIS in high voltage environments.

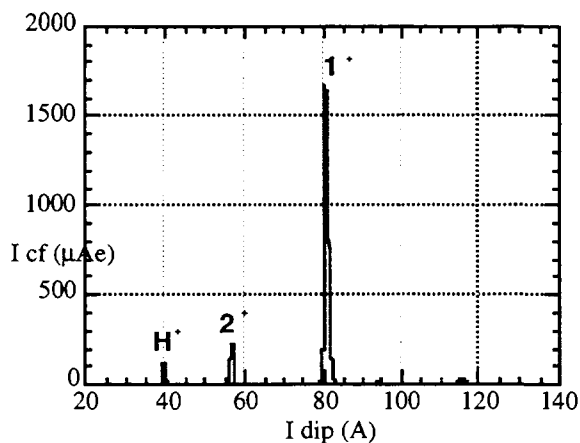


Figure 3: NANOGAN™ 10.0 GHz : He spectrum produced with 20 W

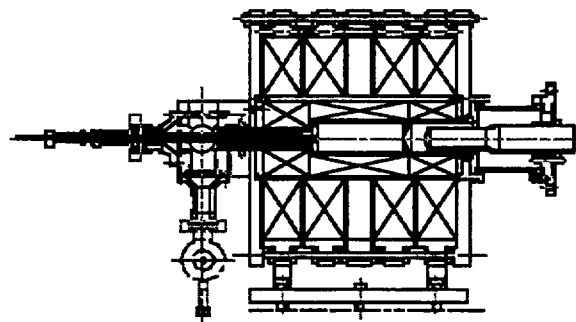


Figure 4 : Fully permanent magnet source SuperNanogan 14.5 GHz

III - SUPERNANOGAN 14.5 GHZ

A. Structure and power consumption

SuperNanogan has been designed in order to be used as injector of high charge state ion on a 200 KV high voltage platform for the ISL cyclotron from HMI [5].

The source and its magnetic parameters are quite closed to the ECR4 one except the diameter of the plasma chamber that is reduced to 44 mm in place of 66 mm [6] (Fig. 1). The useful length of the magnetic mirror is 15 cm, so in this way it is possible to limit the weight of the magnet to roughly 120 Kg (Table I).

TABLE II

TABLE I

SuperNANOGAN main characteristics

f_{ECR}	11-18 GHz
B max	1.05 T
B min	0.40 T
L mirror	170 mm
\varnothing chamber	48 mm
\varnothing source	430 mm
L source	500 mm
FeNdB weight	120 Kg
cooling	water

SuperNANOGAN : possible current/energy optimisation

gas	Q	I μAe	I μAp	Volt (KV)	Ec (MeV)
	1	1500	1500	200	0.2
B (BF ₃)	3	300	100	400	1.2
	5	10	2	400	2.0
	1	1500	1500	200	0.2
P (PH ₃)	5	500	100	400	2.0
	8	100	12.5	400	3.2
	1	1000	1000	200	0.2
As (AsH ₃)	8	300	37.5	400	3.2
	10	100	10	400	4.0

The UHF injection system uses a coaxial geometry similar to the ECR4 one and has been tested with a 200W/TWT transmitter working between 8 to 18 GHz and a 2.0 KW klystron at 14.5 Ghz.

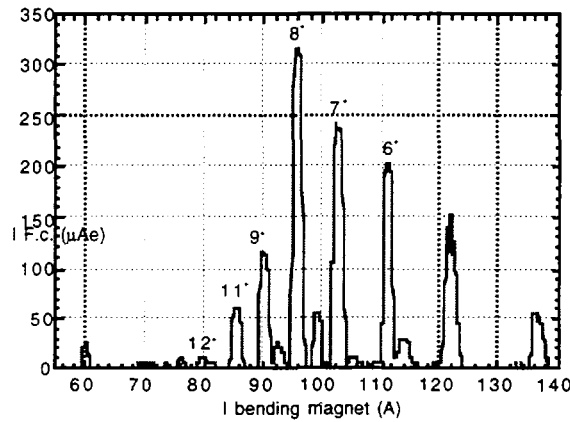


Figure 5 : SuperNanogan 14.5 GHz : Ar spectrum optimized for the charge 8+ (320 μAe)

The standard Ar tests performed with the 14.5 GHz klystron show very characteristic high performance results. We can see (Fig. 2) that we can produce up to 24 μAe of 40Ar^{12+} (2 μAe of 40Ar^{14+}) and 6.5 μAe of 129Xe^{25+} , so the total current extracted from the source and the average Z of the ion is comparable to the ECR4 one and some other high performance machines (Fig. 4).

These results are obtained for 300 to 450 W of UHF power at 14.5 GHz that is roughly two times less than for ECR4. Like observed with Nanogan 10 GHz by respect to ECR3 [1], this ratio of power consumption is for a given magnetic profil proportional to the volume of the plasma chamber.

These preliminary results are done with noble gas but the source can work without any change with standard implantation gas as BF₃, PH₃ or AsH₃. In this case we can see (Table II) what could be the reachable current/energy compromise for production of high energy beam.

IV - MICROGAN 10 GHz

A. Structure and power consumption

The Microgan source has been specially optimised for the production of low charge state, so the source can work with a very simplify magnetic structure and low magnetic field (Fig. 5).

We have maintain a operating frequency of 10 Ghz and a very small plasma chamber in order to minimise the power consumption. The source can work with different magnetic profile in order to produce pure monocharged ion spectrum or reoptimise a simplify minimum B magnetic structure in order to maintain the production of low charged ions.

Preliminary tuning with BF_3 gas (Fig. 6), shows that it is possible to produce typical currents of a standard Freeman ion source, but here without any lifetime limitation.

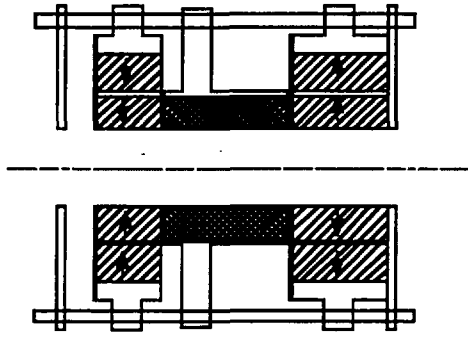


Figure 5 : Fully permanent magnet source Microgan 10 Ghz with tunable magnetic field using moveable magnet rings ($\varnothing_{\text{chamber}}$ 40 mm, $\varnothing_{\text{source}}$ 220 mm, L 300 mm)

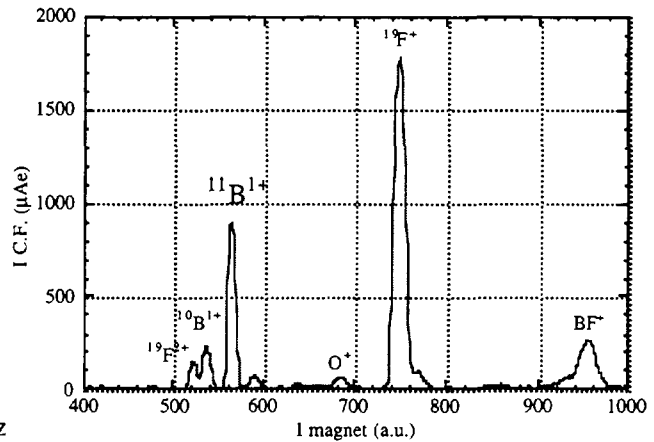


Figure 6 : Microgan 10 GHz : Boron spectrum optimized for B+ 1.14 mAe (.92 mAe ^{11}B + 0.22 mAe ^{10}B / 40 KV

These currents are presently limited by the main power supply (40KV/5 mAe) and the acceptance of the beam line (100 p.mm. mrad). The tuning of the source with Hydrogen and a large acceptance beam line (300 μ .mm. mrad, Fig. 7) show that its possible to extract up to 15 mAe of the source with 70 % of transmission (up to 7 mAe of H^+ at 28 KV).

Currents up to 30 mAe have been extracted with a new matching of the beam with the introduction of a solenoid in place of the einzel lens (Fig. 7 and 10). It is also possible, and without any change of the source, to maintain the production of multicharged ion of Ar like 4+, 6+ or 8+ (Fig. 9).

Typical currents above several milliamperes of B,P and As ions seem very achievable, so it means that it is possible now to replace, in the same environment the old Freeman/Bernas ion sources by more modern and reliable ECR sources.

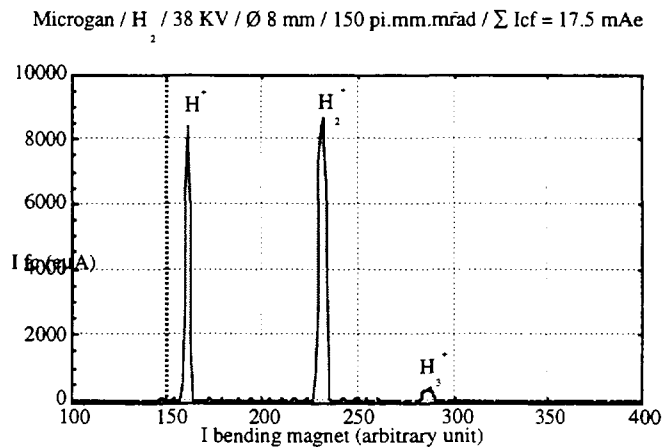
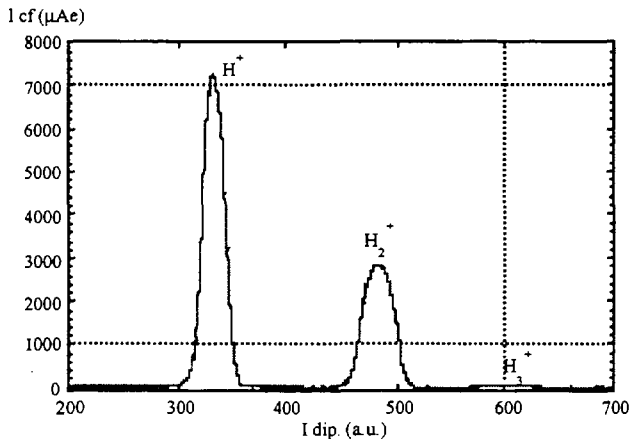


Figure 7 : Microgan 10 GHz : H_2 spectrum optimized for H^+ (7 mAe / 28 KV with Einzel Lens and 9 mAe / 40 KV with Solenoid)

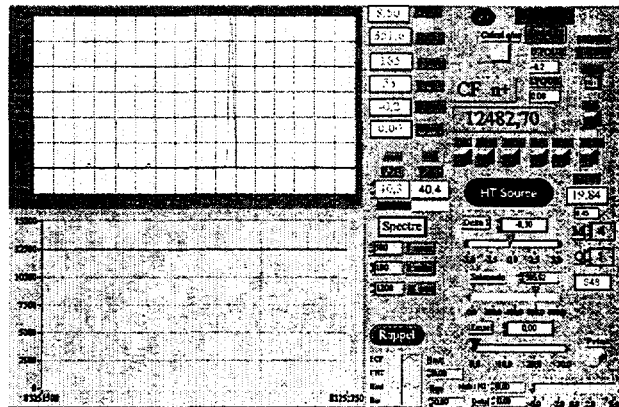
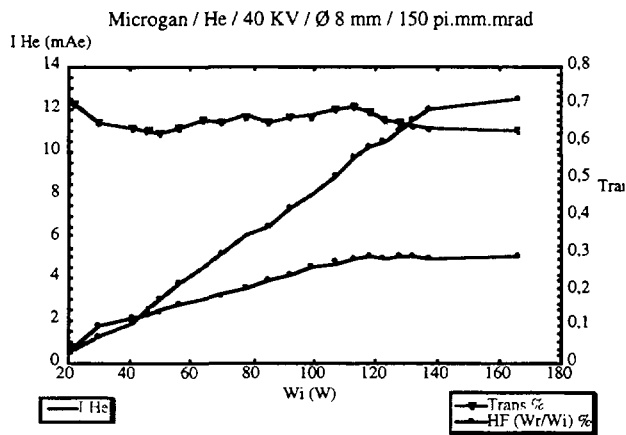


Figure 8 : Microgan 10 GHz : He spectrum optimized for He^+ (12.5 mAe / 40 KV with Solenoid)

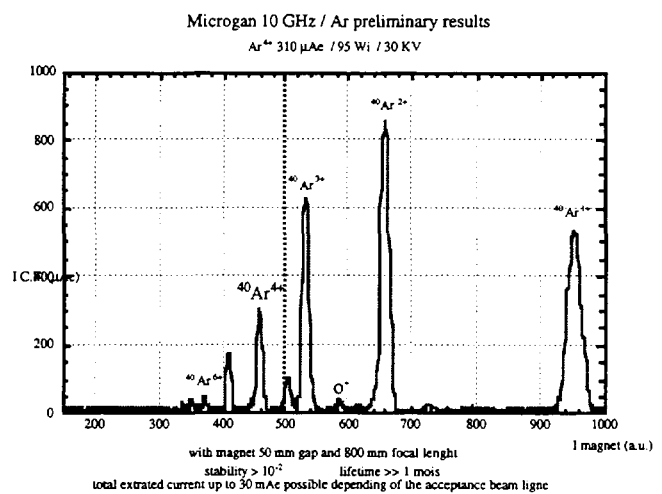
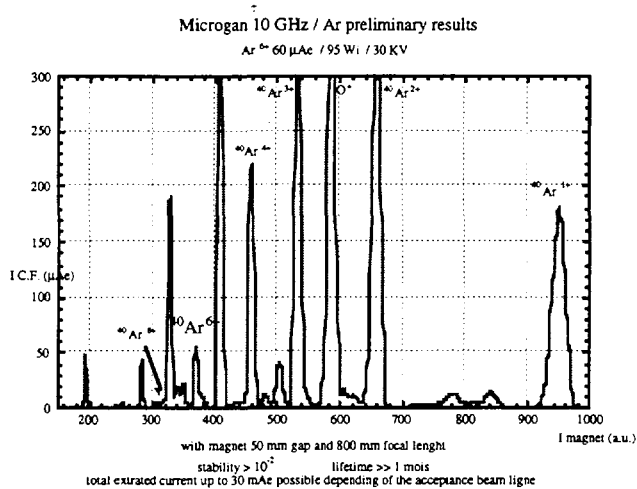
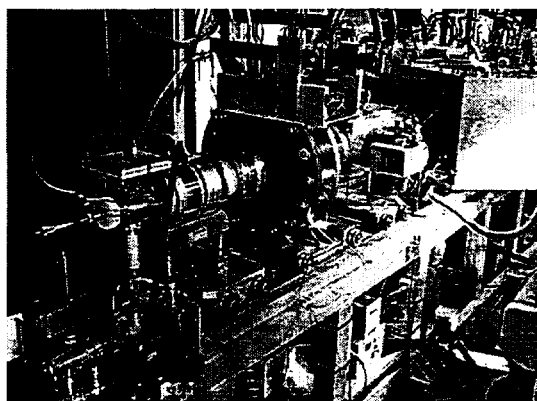
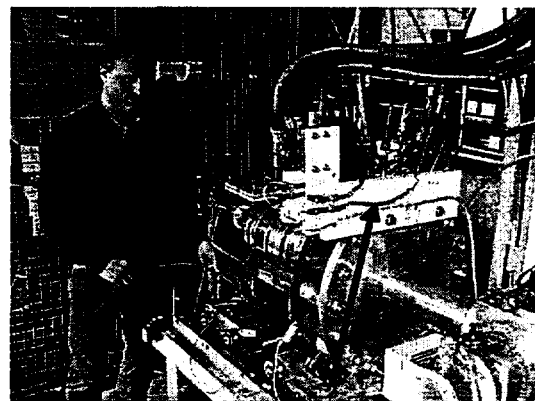


Figure 9 : Microgan 10 GHz : Ar spectrum optimized for Ar^{4+} and Ar^{6+} (0.3 mAe and 0.06 mAe / 30 KV with Einzel Lens)



Microgan 10 GHz



Solenoid 0.9 T, L = 380 mm
masse 10 / 35 KV

Figure 10 : ISNG - Pantechnik / High current beam ligne for 40 KV, 30 mAe of total current

V - CONCLUSION

By the use of the knowhow accumulated in the field of ion source for particule accelerator it is now possible to design, simple various ECR ion sources. These machines are extremely reliable (for exemple the CERN/Geneva ECR4 ion source can produce Lead ions during several months without any maintenance) and also very compact in order to install it on implantation devices without major modification of the environment. Nanogan can be used as a general purpose machine, SuperNanogan as a way to produce MeV beam without high voltage machine and finally Microgan, as an alternative without maintenance to Freeman/Bernas ion sources.

References

- [1] R.C. Pardo et al., Proc. 3th Int. Conf. on Ion Sources, Berkeley, USA, 1989, Rev. Sci. Instrum. 61 1 (1990) 239.
- [2] P. Arndt, K. Golovanivsky, M. Martin, Proc. 11th Int. Work. on Electron Cyclotron Resonance Ion Sources, Groningen, 1993, KVI-Report 996, (1993) 127.
- [3] P. Bricault et al, "An on line isotopic separator test bench at GANIL", Int. Conf on Cyclotrons and Appl., Vancouver 92
- [4] P. Sortais et al, Proc. 11th Int. Work. on Electron Cyclotron Resonance Ion Sources, Groningen, 1993, KVI-Report 996, (1993) 97.
- [5] A.Schempp, Proc. 14th Int. Conf. on App. of Acc., Denton, USA, nov. 96, NIM, to be published.
- [6] P. Sortais et al., Proc. 12th Int. Work. on ECRIS, Riken, Japan, INS-J-182, sept. 95.



ETAT DES RECHERCHES MONDIALES SUR LES INJECTEURS DE NEUTRES A BASE D'IONS NEGATIFS POUR LA FUSION

Claude Jacquot
SCCP/DRFC- C.E Cadarache
13108 Saint Paul lez Durance

Introduction

La génération des grands tokamaks (type JET, TFTR, JT 60) utilisent avec succès l'injection d'atomes neutres de moyenne énergie (100 keV) avec des puissances de l'ordre de 20 à 30 MW. Ceux ci sont produits à partir d'ions positifs qui se transforment en atomes neutres par échange de charge sur une cible gazeuse. Pour les tokamaks de la prochaine génération (ITER par exemple), les dimensions du plasma seront telles qu'une énergie des atomes neutres de 1 MeV sera nécessaire. Les ions positifs ayant un très mauvais rendement de conversion à ces énergies, il sera nécessaire de produire des ions négatifs de deutérium qui ont un rendement de neutralisation acceptable ($\sim 60\%$) quelque soit l'énergie et l'efficacité électrique totale sera de 40 à 50 %. Pour ITER, il est prévu 3 injecteurs à 1 MeV de 16 MW chacun pendant 1000s, ce qui nécessite l'accélération de 40 A de D. à 1 MV par injecteur. Dans cette présentation, nous évoquerons l'état des recherches sur les grandes sources et leurs problèmes, l'état des recherches sur l'accélération à forte tension et nous présenterons quelques réalisations de grande puissance.

Etat des recherches sur les grandes sources d'ions négatifs deutérium

Aujourd'hui, une source d'ions D. pour application à la Fusion thermonucléaire demande des spécifications très précises :

Elle est de volume métrique, multifilaments et la préaccélération du faisceau est obligatoirement réalisé à l'aide d'un système multitrous à 3 grilles (électrode plasma, électrode d'extraction (qq kV) et électrode de préaccélération (50 à 100 kV)) avec une transparence de l'ordre de 0.4.

Elle doit extraire sur une grande surface (fig 1), une densité de l'ordre de 20 mA/cm² avec une pression de fonctionnement la plus basse possible (inférieure à 0.2 Pa) pour éviter un trop fort épluchage des ions négatifs dans l'accélérateur. Le fait qu'elle doive travailler à basse pression oblige à concevoir une source à bon confinement magnétique (type multicusp ou équivalent) avec un filtre magnétique transverse à l'extraction pour éviter une trop forte extraction d'électrons (rapport $I_e/I_{D-} < 1$). De ce fait ce type de source sera nécessairement une source à très fort taux de protons.

L'addition de césium avec un flux contrôle de l'ordre de 20 mg/h est nécessaire pour obtenir la densité de 20 mA/cm² avec des puissances d'arc de l'ordre du kW/l. Par rapport à la production en volume, le gain en densité peut être de l'ordre de 6 à condition que la température de la grille plasma soit maintenue à une température de 300 °C. La grille plasma étant maintenue en température par le rayonnement de l'arc (3000 A*55 V), il est nécessaire de maintenir sa température constante pendant 1000 s. Deux prototypes de grille plasma ont été testés et semblent donner toute satisfaction (fig 2). Des impulsions de 1000 s ont été réalisées ainsi que l'extraction de 20 mA/cm² de D- (1.4 A au total) pendant 120 s. (fig 3).

L'homogénéité verticale est perturbée par les dérives dues au gradient de B du filtre magnétique et par la présence de $E \cdot B$ du à la polarisation de la grille.(fig 4) . elle peut être

corrigée dans les grandes sources par une possible modulation des courants filaments. Après l'injection de 0.6 g de Cs, l'effet de température de la grille plasma est évident (Fig 5).

Etat des recherches sur les accélérateurs électrostatiques à forte tension (300 kV à 1 MV)

Pour une raison d'efficacité électrique, l'accélération est du type électrostatique continue. Une alimentation électrique (1 MV, 40 à 50 A) est connectée à un système d'accélération multi-électrodes (MAMUG)(fig 6) ou à un seul étage (SINGAP)(fig7). L'alimentation doit supporter les fréquents claquages de court circuit durant le conditionnement de l'accélérateur avec un temps d'interruption inférieur à 0.1 s et doit limiter le courant de court circuit à moins de 2 kA. Chaque système a fonctionné à faible courant (0.1 A) jusqu'au MV pendant quelques secondes et à fort courant (> 15 A) à 300 kV pendant 2 s. Les problèmes rencontrés avec ces accélérateurs sont dans le cas de MAMUG une difficulté de pompage dans l'accélérateur avec les pertes supplémentaires sur les grilles dues aux électrons. SINGAP, de ce point de vue est plus intéressant car le pompage est plus efficace et la réalisation mécanique moins coûteuse. Cependant il doit faire ses preuves à plus forte densité et à plus fort courant.

Réalisation de grands systèmes pour la Fusion.

A ce jour, seuls les japonais ont développé des systèmes d'injection de neutres basés sur ces principes et connectés au tokamak JT60 (JAERI) ou au stellarator (LHC) (NIFS).

Dans le cas de l'injecteur de JT 60 (nominal 20 A D₀, 500 kV avec 2 sources), ce système associe une source KAMABOKO, un accélérateur MAMUG à 3 étages, un neutraliseur à gaz de 11 m et un déflecteur magnétique des ions D. non neutralisés et des ions D₋ produits. Une puissance de neutres de 5.2 MW a été injectée avec deux sources à 320 kV pendant 1.9 s (Fig 8). La limitation en temps est due à une très forte charge thermique des grilles qui peut être causée par une non uniformité des sources, une mauvaise maîtrise de l'optique des sous faisceaux, des électrons parasites accélérés ou un mauvais transport des ions D. entre l'accélérateur et le neutraliseur ou une zone de pompage est obligatoirement aménagée. Dès maintenant, avec ce type de faisceau, JT 60 a montré des résultats intéressants. Des progrès substantiels doivent être menés pour améliorer la transmission de l'accélérateur. Par contre, le rendement de neutralisation s'avère conforme aux prédictions (55 %).

Dans le cas des injecteurs pour le LHC qui utilisera aussi 2 injecteurs, les puissances nominales seront 40 A par source de H. à 200 kV pour une puissance totale de 10 MW de H₀ pendant 10s. Les injecteurs ont été testés et plus de 25 A de H. ont été extraits 3.7 MW à 100 kV.

Enfin, dans le cadre des études sur ITER, un principe d'injecteur a été proposé (Fig 6) tenant compte des contraintes propres à ITER (environnement très hostile du au tritium et aux neutrons) et la nécessité d'incorporer les injecteurs au cryostat pour réduire les dimensions hors tout de la ligne et donc en fin de compte de réduire le coût.

Conclusion

Aujourd'hui, nous pouvons considérer que les injecteurs à base d'ions négatifs ont démontré leur crédibilité pour le chauffage et la génération de courant dans les machines de Fusion. Des progrès restent à accomplir dans le domaine de l'homogénéité des grandes sources et dans la transmission de l'accélérateur. Toute tentative de réduction des coûts est aussi à encourager.

Remerciements

Je voudrais remercier tous mes collègues de Cadarache (J. Paméla, M Fumelli, R Hemsworth, P Massmann, A Simonin, R. Trainham C Desgranges, J Bucalossi) qui ont participé à l'expérience SINGAP ainsi qu'à l'expérience Kamaboko 1000s. Je tiens également à remercier nos collègues japonais et plus particulièrement l'équipe du JAERI (Y Okumura, M Kuriyama, K Watanabe, Y Fujiwara, K Miyamoto) ainsi que l'équipe NIFS (O Kaneka, y Takeiri, K Tsumori) pour les informations qu'ils ont pu me fournir.

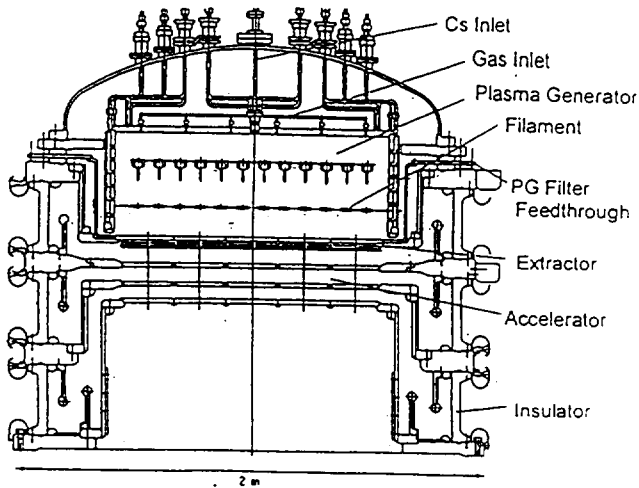
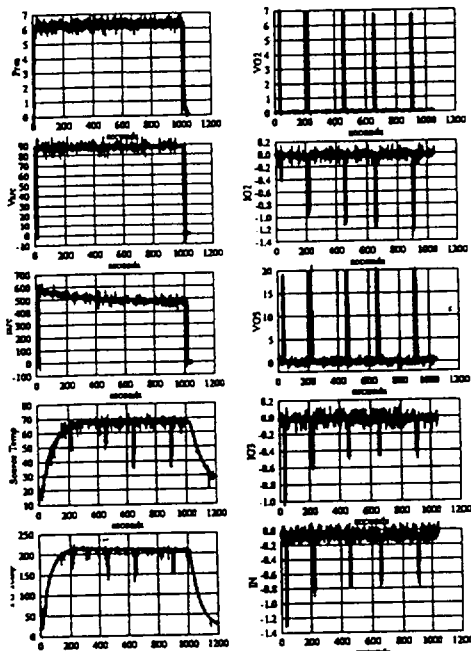


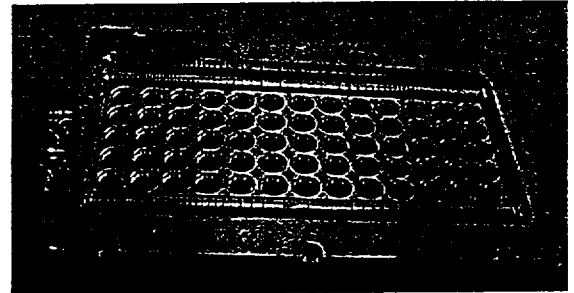
Fig 1



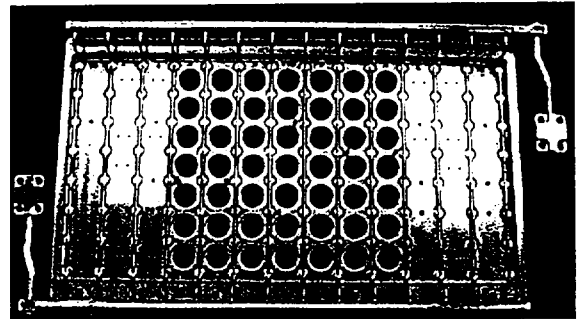
Deuterium plasmas can be generated for durations of 1000 s, but the neutron production presently limits the D⁺ beam to a few 10 s pulses. This pulse shows results for the Frame Cooled Grid at 35 kW of arc power, and a source seeding of less than 600 mg of Cs. The current density drops to about 100 A/m² as the pulse progresses.

Fig 3

Long Pulse Grids Provided by JAERI



1 Cu/Cr/Zr long pulse grid (6 mm thick).
A thermal bridge limits the heat flow to the cooling channels along each edge



2 Molybdenum long pulse grid (6 mm thick).
A set of stainless steel disks act as thermal bridges between the grid and copper cooling tubes traversing the grid.

Fig 2

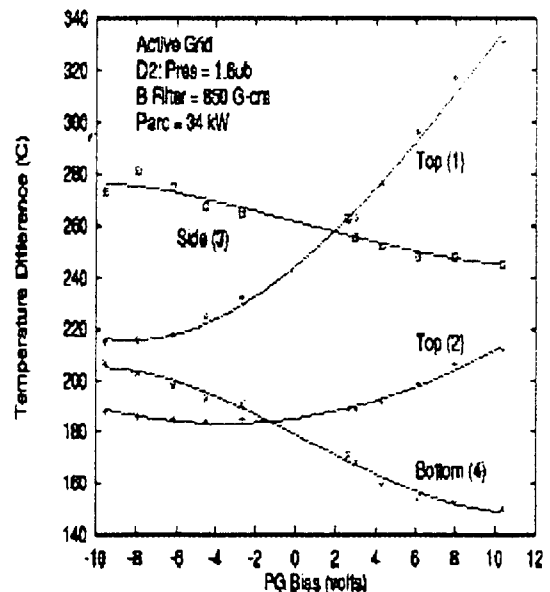


Fig 4

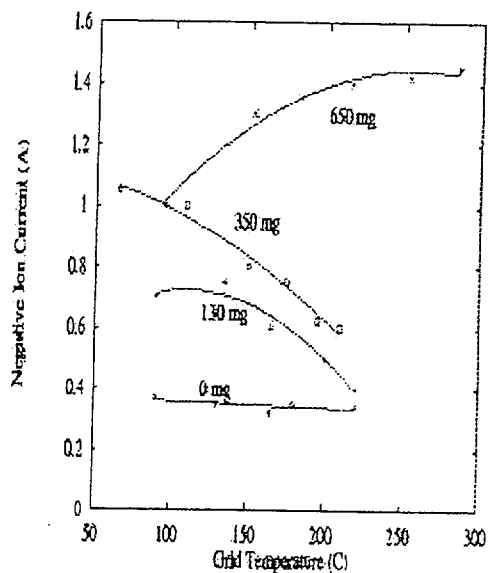
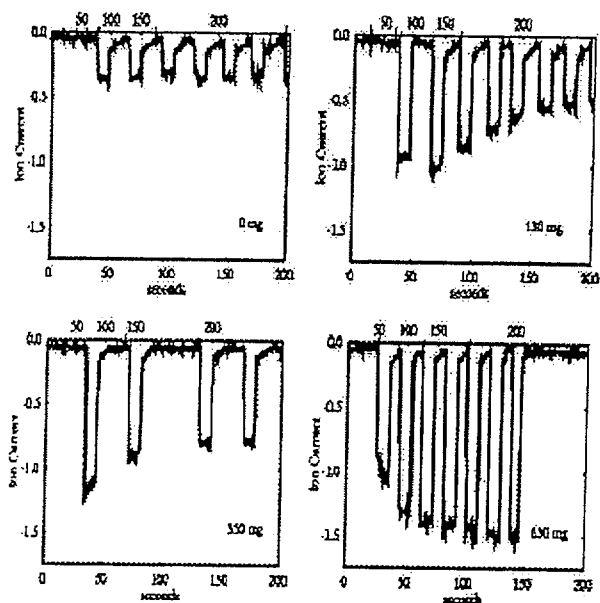


Fig 5

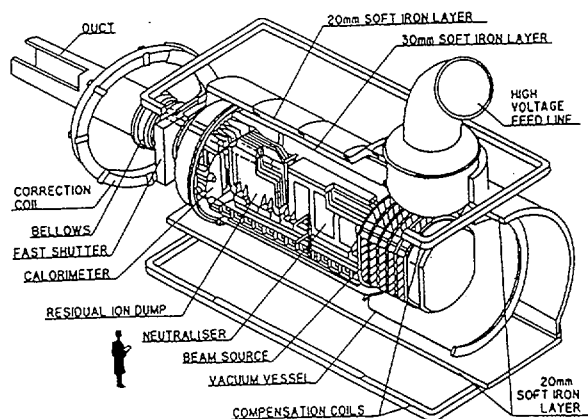


Fig 6

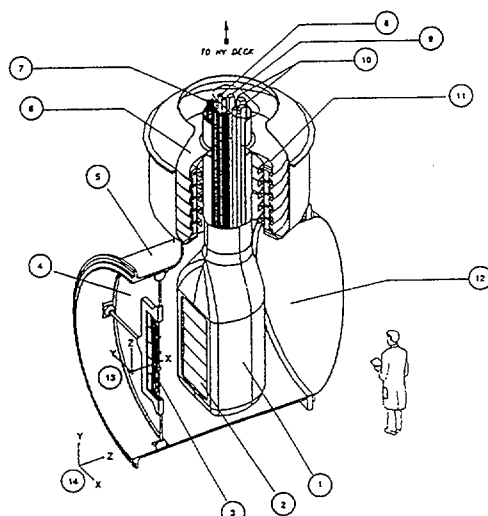


Fig 7

FIG. 1
Isometric View of the SIN
Beam Source (SIBS)

- (1) HV Source (-1 MV)
- (2) Pre-Acceleration Grid
- (3) Movable SINGAP Electrode
- (4) High Transparency Screen
- (5) Vacuum Vessel
- (6) Insulating Pressurised Gas
- (7) Filament Busbars
- (8) Coolant Lines
- (9) High Current Bus Bars
- (10) Gas Lines
- (11) HV Bushing
- (12) Vacuum
- (13) ITER Coordinates
- (14) SIMION Coordinates

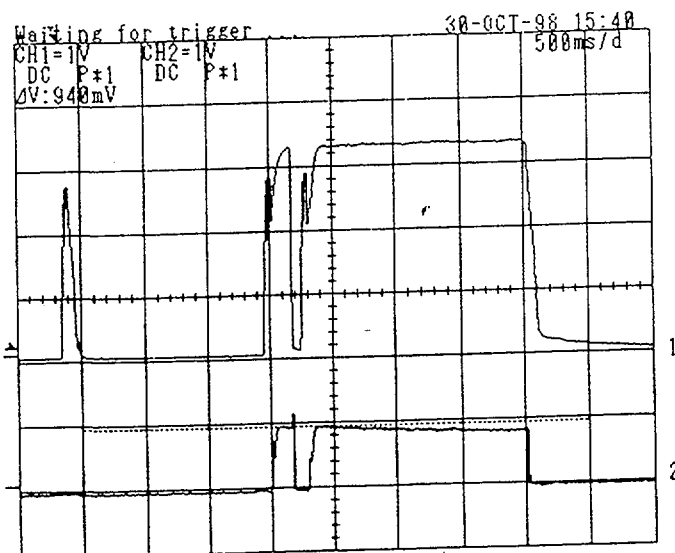


Fig 8



Effet du césium et du xénon dans les sources d'ions négatifs d'hydrogène.

M.Bacal, C. Deniset, L.I.Elizarov and F. Sube

Laboratoire de Physique des Milieux Ionisés, U.M.R. 7648 du C.N.R.S.,
Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau.

L'adjonction de césium dans les sources en volume d'ions négatifs conduit à une forte réduction du courant d'électrons extraits, et dans certains cas, à une augmentation du courant d'ions négatifs extraits. Parmi les causes de ces phénomènes, la réduction de la température électronique par l'adjonction d'atomes, plus lourds, de césium a été proposée. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons ajouté du xénon au plasma de la source d'ions négatifs H⁻ « Camembert III », le xénon ayant un poids atomique proche à celui du césium (131,30 pour le xénon, 132,90 pour le césium). Leung et al¹ ont étudié l'effet de l'adjonction du xénon sur le courant d'ions négatifs extrait, et ont trouvé un effet positif. Nous avons étudié la densité relative d'ions négatifs et d'électrons dans la région d'extraction à l'aide du photodétachement laser. La Figure 1 présente les résultats de notre expérience avec adjonction de xénon, et les compare à ceux obtenus dans l'hydrogène pur. On peut noter que l'adjonction de xénon réduit la densité relative d'ions négatifs et conclure que l'augmentation observée lors de l'adjonction de césium doit être attribuée à d'autres propriétés du césium, mais non à sa forte masse. La spécificité du césium par rapport au xénon consiste dans la présence de molécules CsH et d'états de Rydberg moléculaires, qui tous les deux peuvent conduire à la formation d'ions négatifs par attachement dissociatif. La propriété du césium de former des dépôts de faible travail de sortie sur les parois peut conduire localement à la formation d'ions négatifs suite au bombardement par des atomes d'hydrogène. Pourtant ce processus de formation n'explique pas les observations faites au centre du plasma « Camembert III », dont la taille exclut la survie des ions négatifs de la paroi au point de mesure.

Un autre résultat qui confirme la réduction de la densité relative d'ions négatifs en présence de xénon est présenté sur la Figure 2: le rétablissement de la densité d'ions négatifs après une impulsion laser, dans l'expérience à deux lasers, destinée à la mesure de la température des ions négatifs dans la région d'extraction. On y compare le cas de l'hydrogène pur, à celui du mélange hydrogène-xénon. On peut noter le bon accord du rétablissement dans le cas du mélange avec les prédictions de la théorie balistique². Nous avons observé une forte anomalie de ce rétablissement dans l'hydrogène pur³. Plus récemment nous avons observé que l'adjonction de césium augmentait cette anomalie⁴, en même temps qu'elle augmentait la densité relative d'ions négatifs. L'explication de ces effets réside dans la formation de champs électriques autocohérents au moment du photodétachement, champs qui conduisent aux déviations par rapport à la théorie balistique.

Références.

1. K.N. Leung, K.W. Ehlers, R.V. Pyle, Rev. Sci. Instrum., 56, 2097 (1985)
2. R.A.Stern, P.Devynck, M.Bacal, P.Berlemont, F.Hillion, Phys.Rev. A, 41, 3307 (1990).
3. C. Courteille, Thèse de Doctorat de l'Université de Caen, 1993, Rapport P.M.I. 2795.
4. M. Bacal, A.A.Ivanov, A.B.Sionov, L.I. Elizarov, F. Sube, 1998 ICPP, Contributed Papers. Praha, June 29-July 3, 1998, p. 1678-1681. Europhysics Conference Abstracts. Vol. 22C. Editor P. Pavlo.

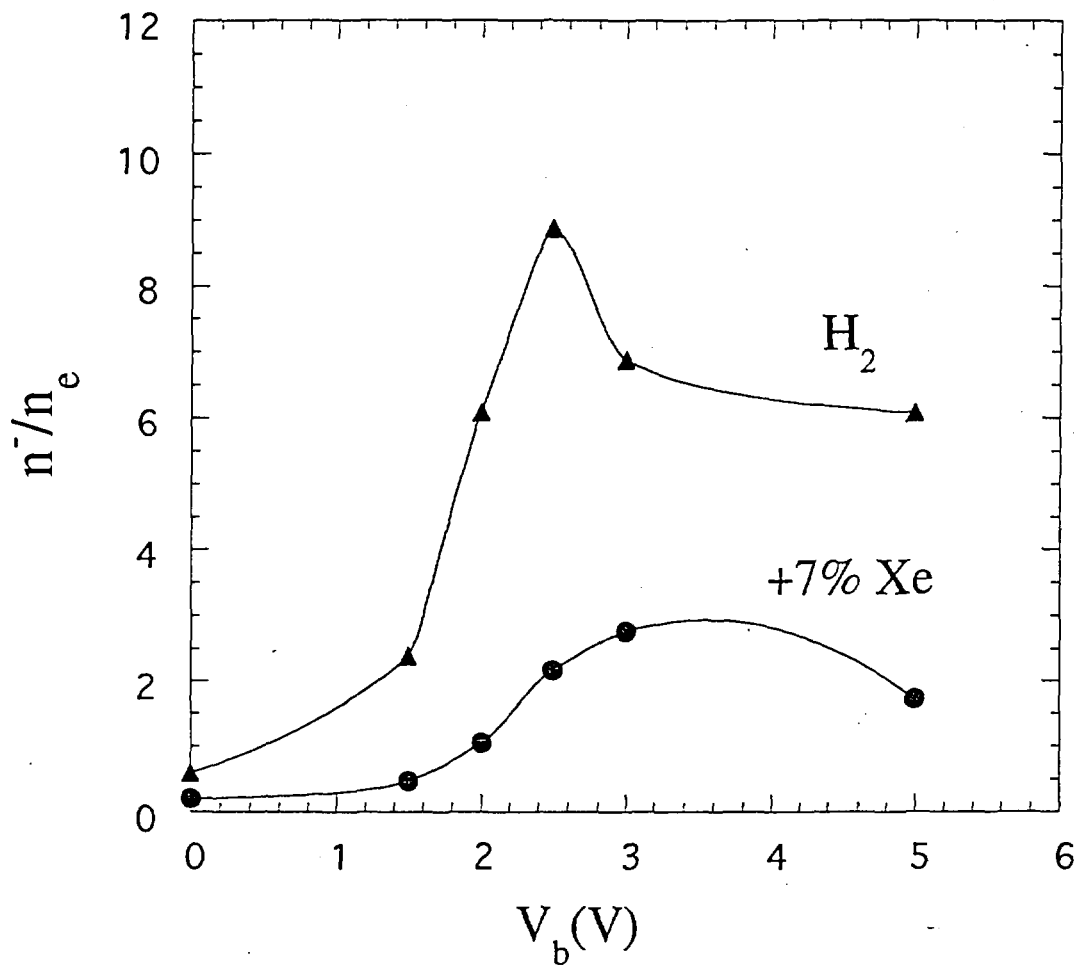


Figure 1. Rapport n^-/n_e en fonction de la polarisation de l'électrode plasma, V_b , dans H_2 et dans le mélange $H_2 + Xénon$. La pression est 3 mTorr, la décharge 50 V - 50 A, la polarisation de la sonde 50 V.

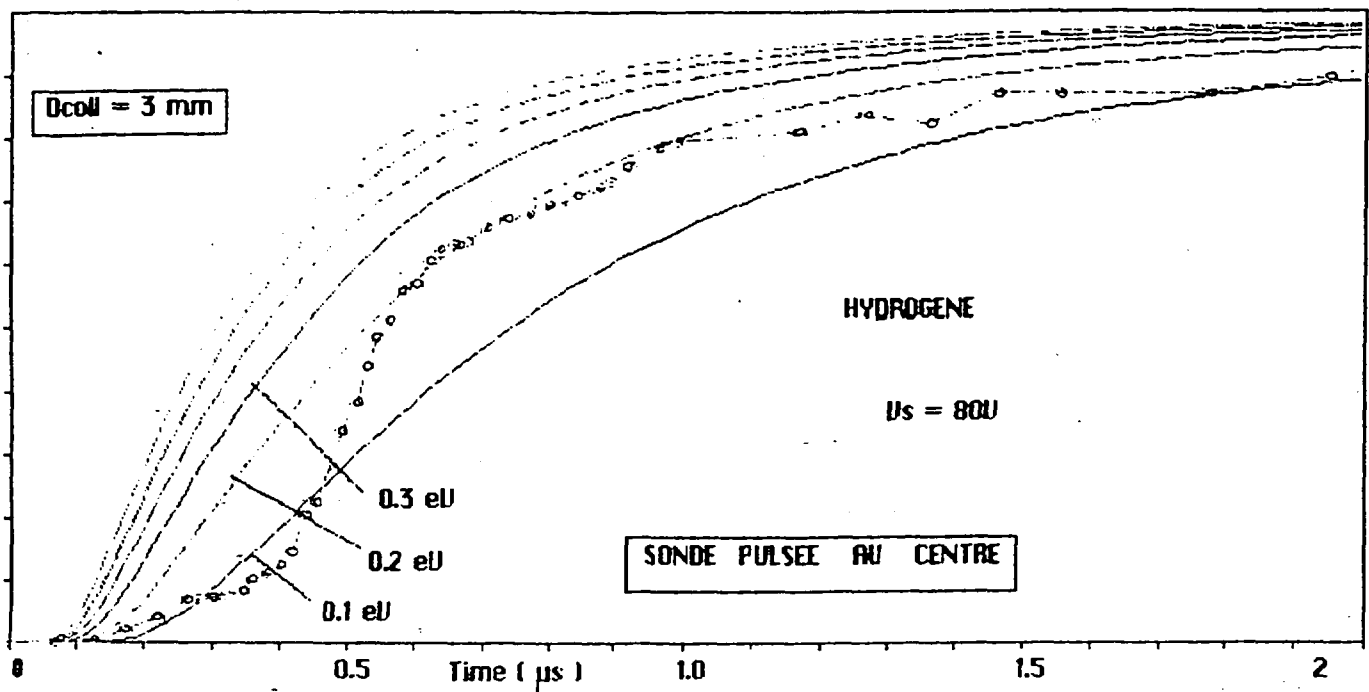


Figure 2a. Expérience à deux lasers. $P=3\text{mTorr}$. Décharge 50 V, 50 A. $D_L = 6 \text{ mm}$.
Hydrogène pur.

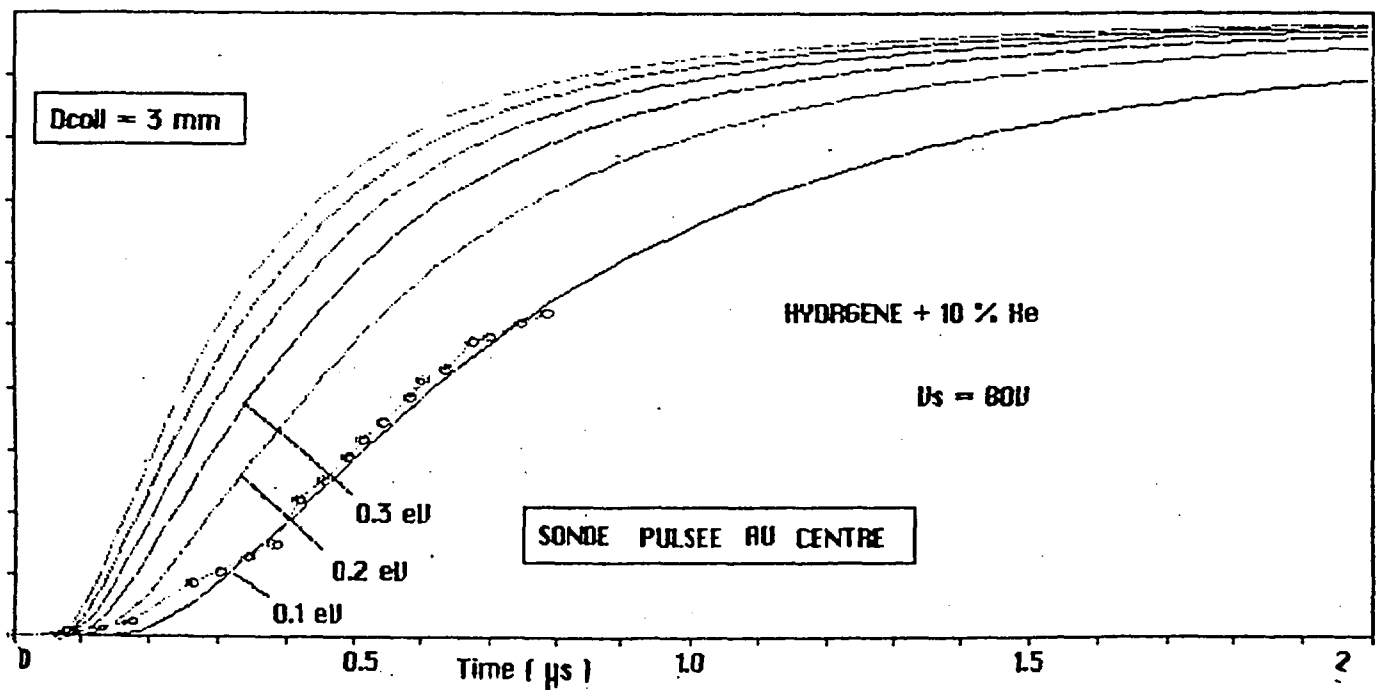


Figure 2b. Expérience à deux lasers. $P=3\text{mTorr}$. Décharge 50 V, 50 A. $D_L = 6 \text{ mm}$.
Hydrogène et xénon.

« Les derniers résultats expérimentaux sur les propulseurs à effet Hall »

Y. DANTAL

(Article non communiqué)

« Production d'ions polyatomiques »

S. DELLA NEGRA

(Article non communiqué)

Expériences et perspectives d'une source supraconductrice

Denis HITZ, Alain GIRARD, Gérard MELIN

Département de Recherche Fondamentale sur la Matière Condensée

Service des Ions Atomes et Agrégats

CEA / Grenoble

17 Rue des Martyrs

38054 Grenoble cedex 9



FR9903409

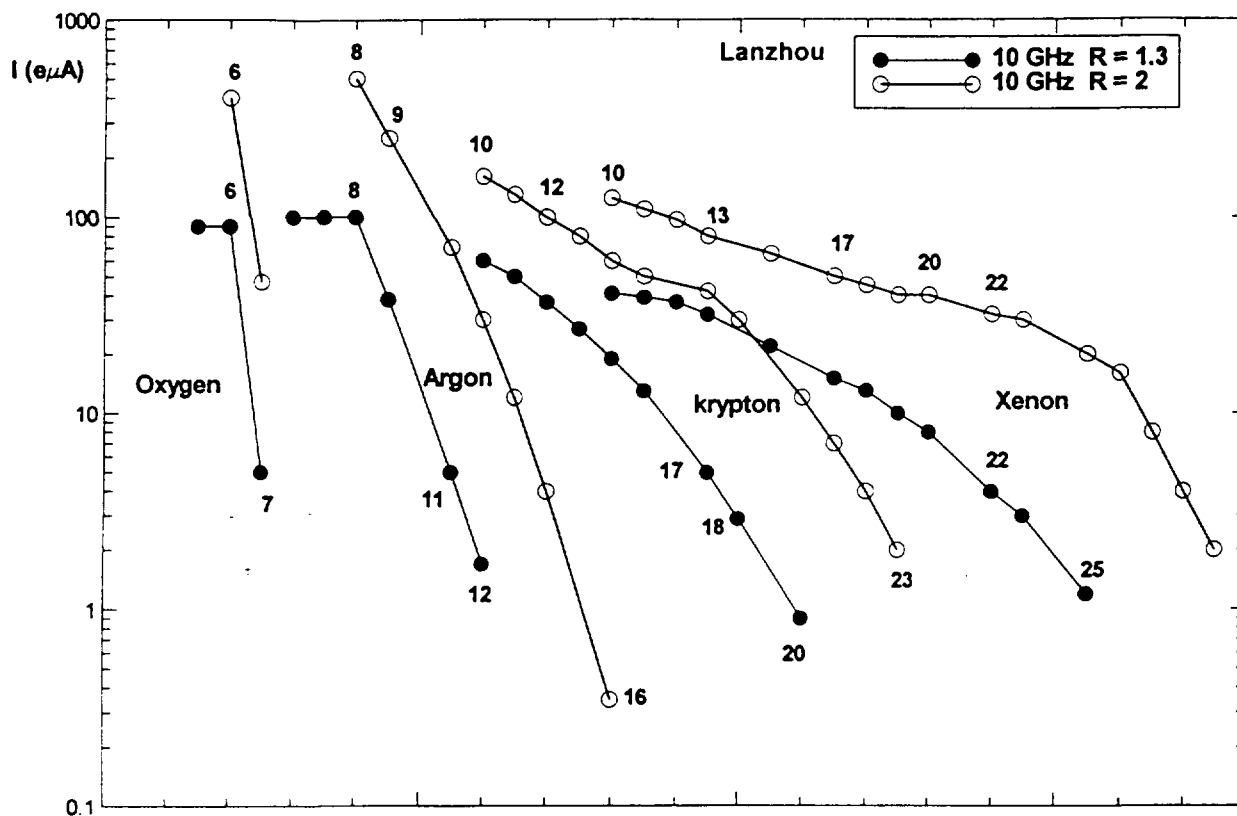
- ✓ Critères pour l'élaboration d'une source ECR
- ✓ Rôle de la fréquence de chauffage
- ✓ Rôle du confinement magnétique
- ✓ Application à une source supraconductrice
- ✓ Perspectives

Critères pour l'élaboration d'une source ECR

PHYSIQUE	CRITERE	TECHNOLOGIE
Résonance cyclotronique mode whistler	$B_{\alpha r} = (m/e) \omega_{\alpha}$	Champ magnétique faible : aimants permanents Champ magnétique moyen : systèmes hybrides Champ magnétique élevé : aimants supraconducteurs
Confinement électronique axial injection : fort confinement extraction : fortes pertes	"high-B" mode (MSU, SERSE)	Pour $B_{inj} > 2$ T : supra 4 K
Confinement électronique radial	Rapport miroir $R = B_{max} / B_{min} > 2$	Aimants permanents (Nd Fe B) aimants supraconducteurs
Confinement ionique	Grand plasma	forte contrainte sur la technologie des aimants aimants permanents → petite chambre à plasma
Haute énergie et densité élevée $n_e T_e \propto \omega^2$	Fréquence élevée	$f < 2.45$ GHz : magnétrons $2.45 < f < 18$ GHz : TOP, klystrons $f > 18$ GHz : gyrotrons
Injection d'électrons	"1 ^{er} étage" efficace	sonde polarisée, cathode chaude, plasma
Extraction	adaptation de l'émittance de la source à l'acceptance de l'accélérateur	fort courant = haute tension élevée

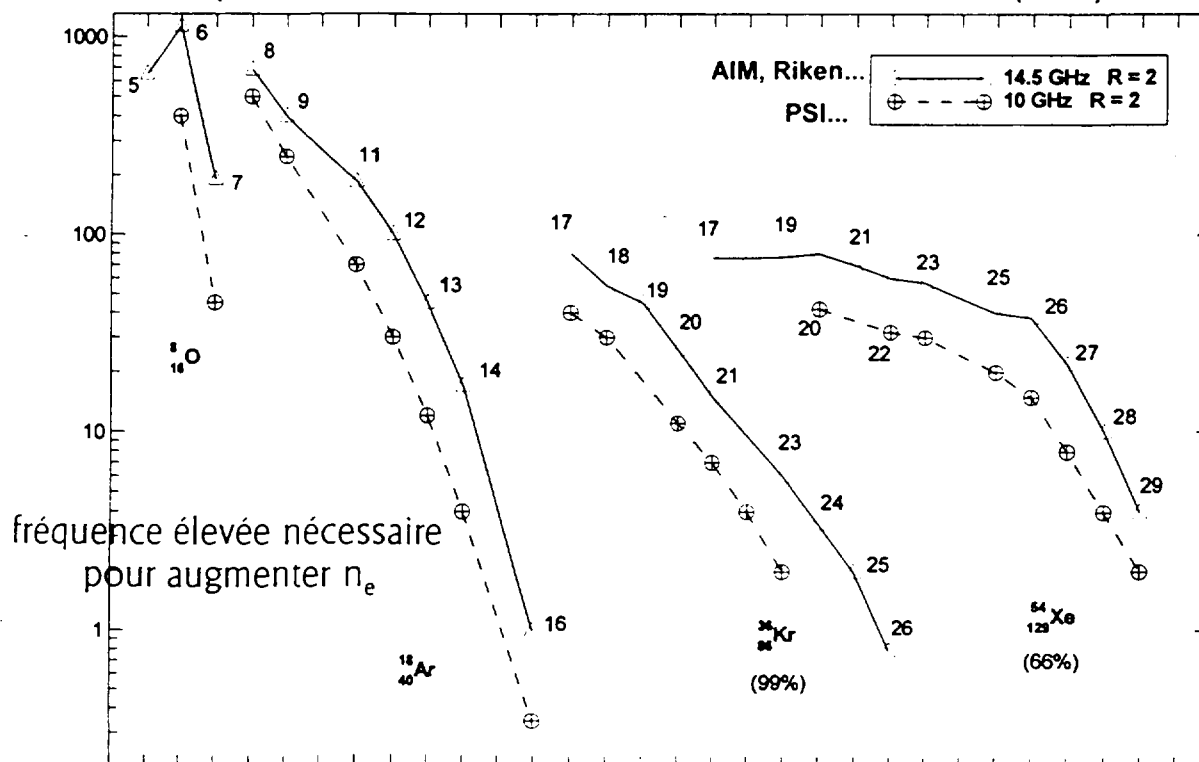
Rôle du confinement électronique

Caprice 10 GHz avec 2 confinements différents ($R = 1.3$ and $R = 2$)

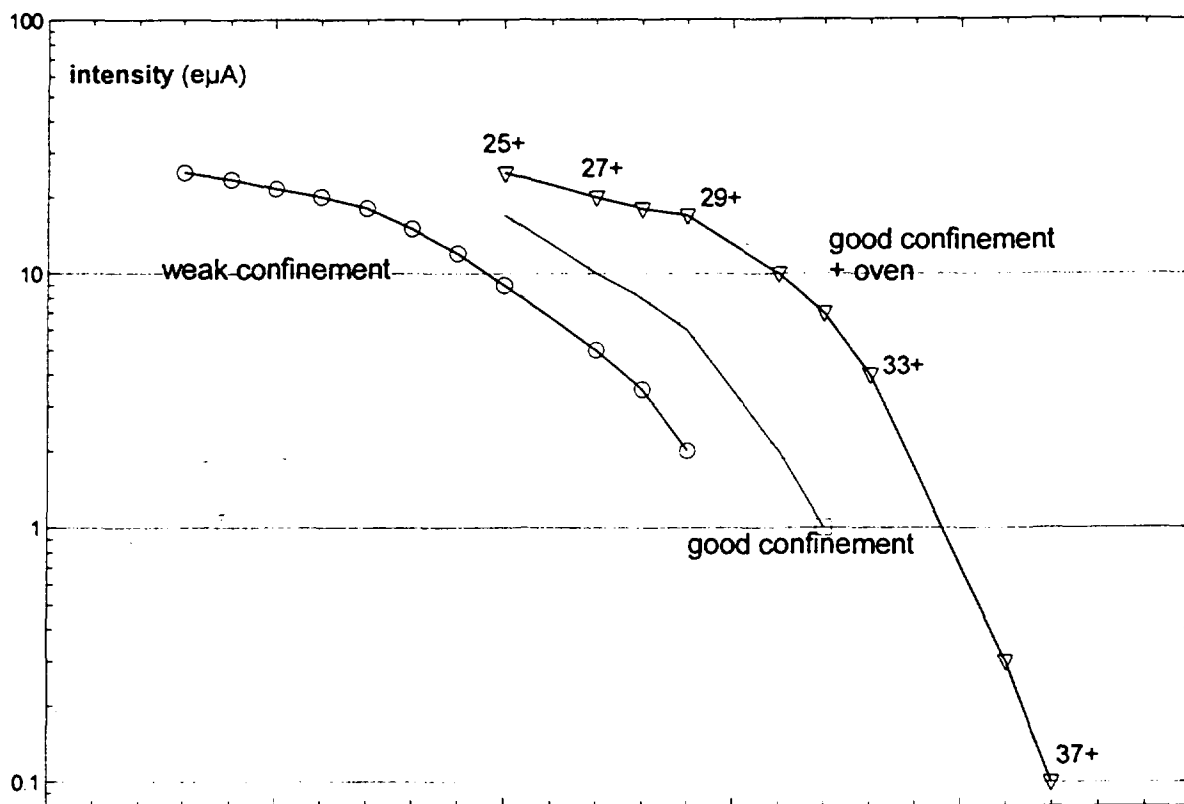


Rôle de la fréquence

Caprice 10 et 14.5 GHz avec le même confinement ($R=2$)



Courants de Plomb (mode continu) à 10 GHz

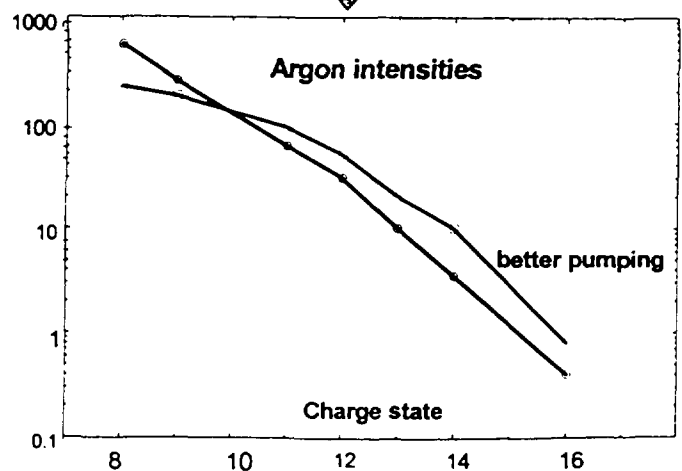
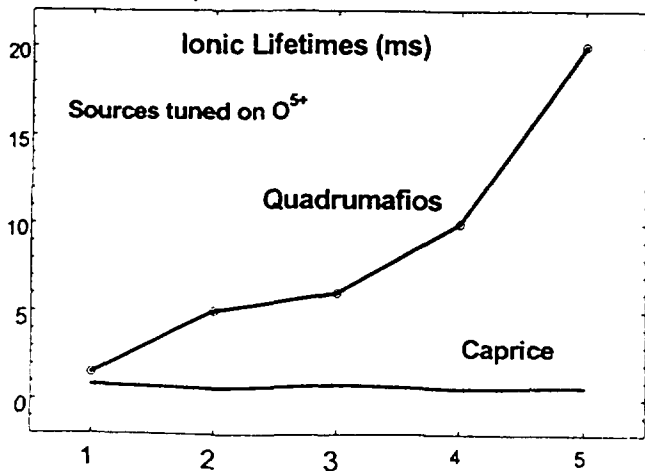


Rôle du volume du plasma

Larger volume = larger ionic lifetimes



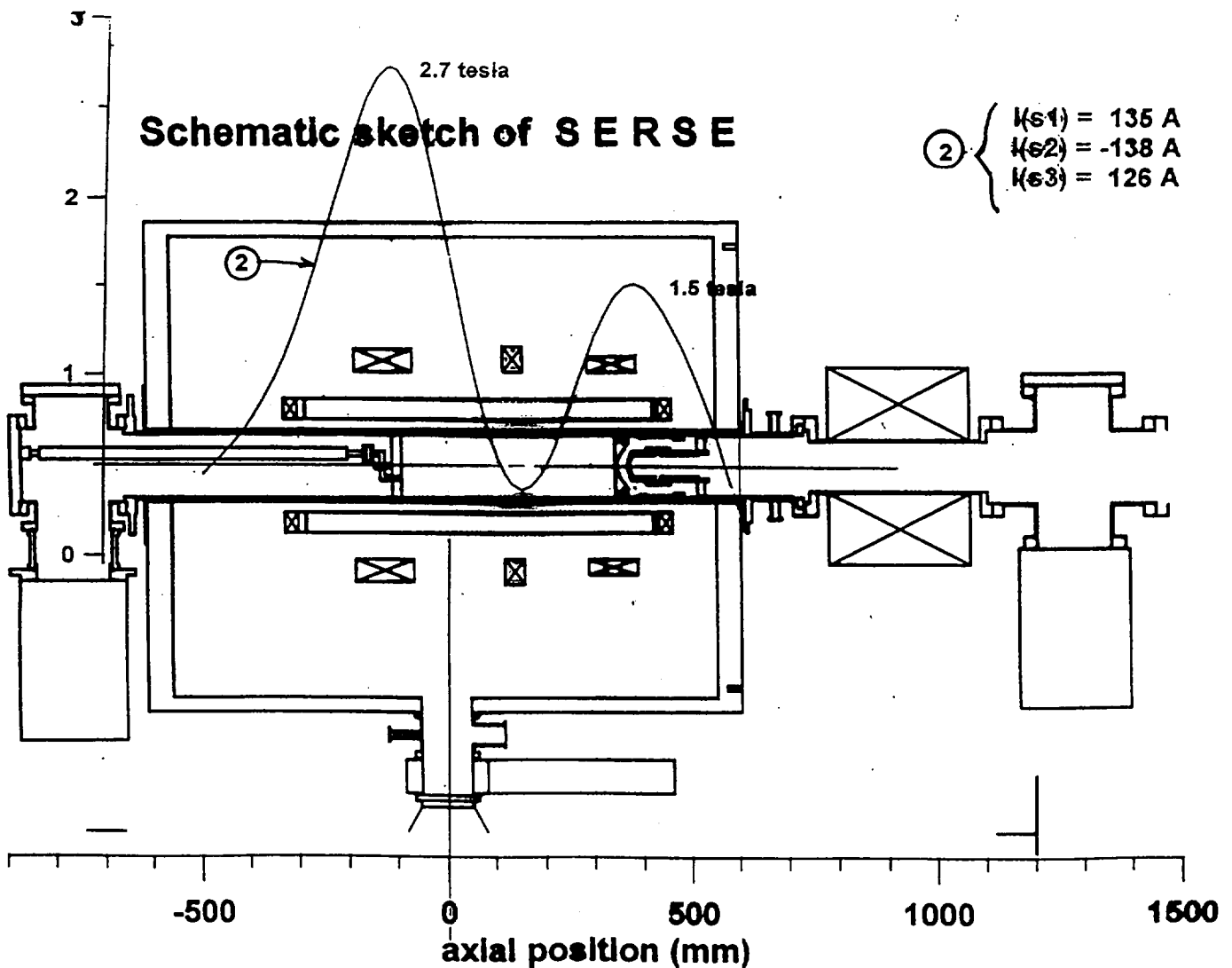
Better pumping = higher charge states



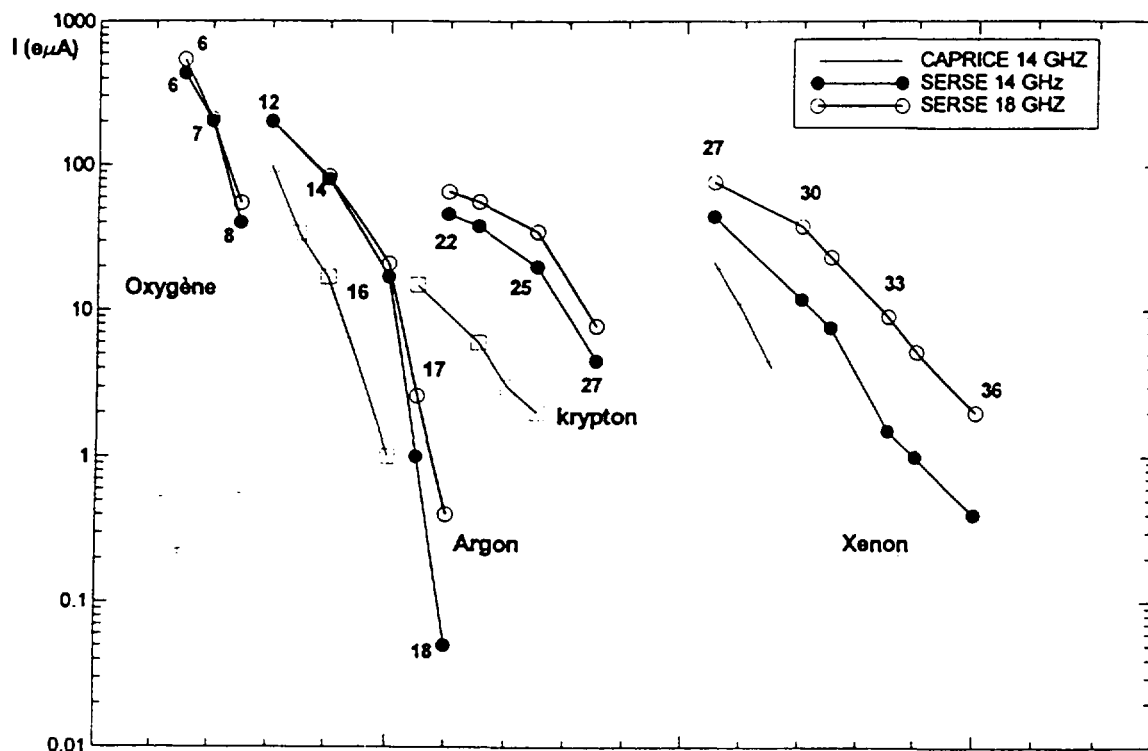
SERSE

Collaboration:
INFN / LNS / Catania
CEA / DRFMC / SBT
CEA / DRFMC / SI2A

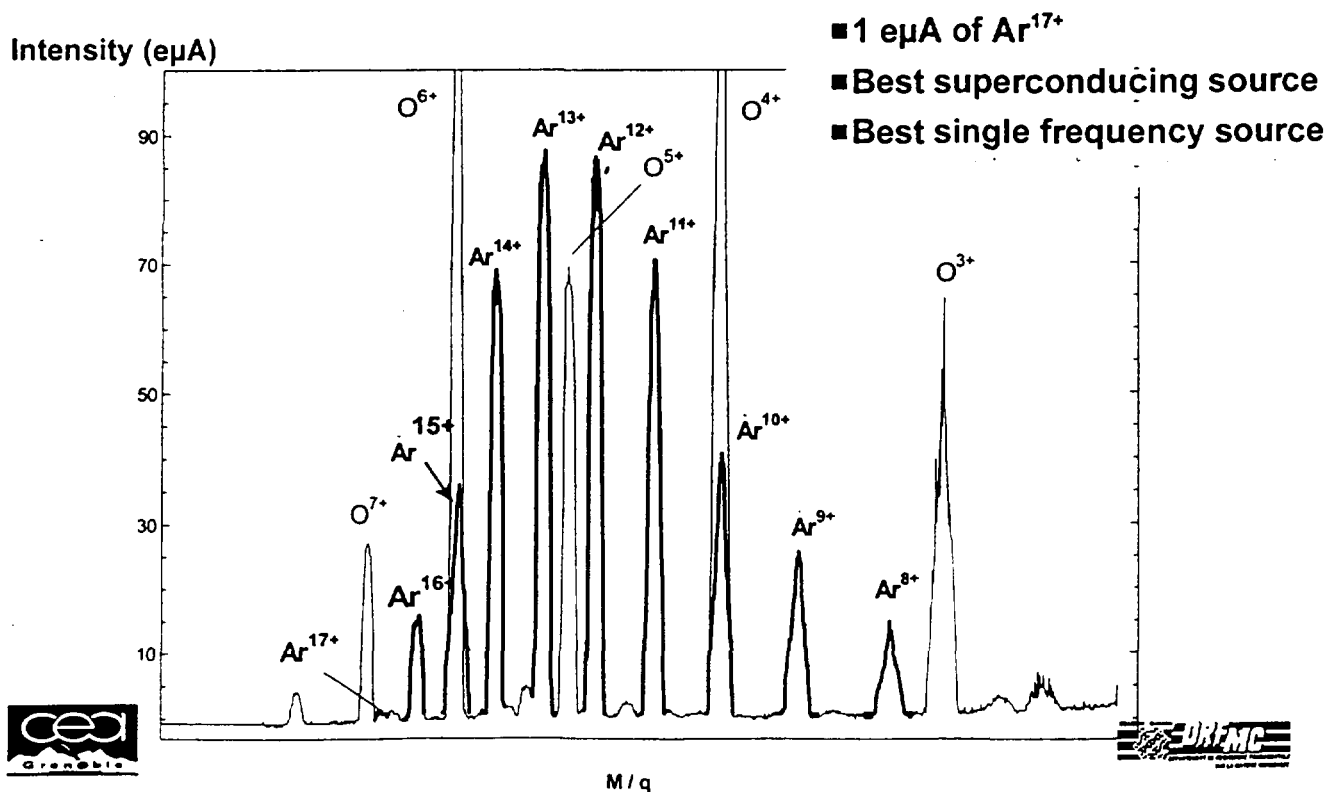
- ✓ B_{\max} injection = 2.7 T
- ✓ B_{\max} extraction = 1.6 T
- ✓ B_{rad} = 1.55 T (dans la chambre à plasma)
- ✓ \varnothing chambre à plasma = 130 mm
- ✓ Fréquence de chauffage = 14.5, 18 GHz
- ✓ Longueur zone de résonance à 14.5 GHz = 5 cm (8cm à 18 GHz)



Résultats de SERSE



Distribution des états de charge de l'argon lorsque la source est optimisée sur 17+



Perspectives

Injection de 28 GHz dans SERSE

première étape du développement d'une source ECR à forte intensité d'états de charge moyens (1mA de Pb^{25+})

collaboration

- ☞ CERN (H. Haseroth, C. Hill)
- ☞ GSI (N. Angert)
- ☞ ISN (P. Sortais)
- ☞ INFN (G. Ciavola, S. Gammino)
- ☞ SI2A (D. Hitz, A. Girard, G. Melin)

Injection du 28 GHz dans une ECR

gyrotron : oscillateur micro ondes basé sur l'interaction des électrons tournant dans un champ magnétique dans la condition de résonance cyclotron électronique

technologie gyrotron :

- disponible : 10 kW DC
- puissance de sortie : fonction
 - ★ du courant cathode
 - ★ de la haute tension d'extraction des e^- (30 kV)
- seule protection du tube : détecteur d'arc

nouveau mode de couplage des micro ondes au plasma

- jusqu'à 18 GHz : guide rectangulaire TE_{11}
- à 28 GHz : mode de sortie : TE_{02} : difficile à transporter sans changement de modes

« Interface plasma-faisceau dans les sources ECR, expériences théorie »

J.L. LEMAIRE

(Article non communiqué)



FR9903410

Transport of charged particles in the plasma of an ECRIS

A. Girard, C. Perret, G. Douysset, G. Melin.

Département de Recherche Fondamentale sur la Matière Condensée
Service des Ions Atomes et Agrégats
CEA Grenoble 17 rue des Martyrs 38054 Grenoble Cedex

1. Introduction
2. Transport des électrons
 - 2.1 Expériences ; mesure des temps de vie, contradiction.
 - 2.2 Modélisation
3. Transport des ions
 - 3.1 Expériences : mesure de la K_{α} de l'argon
 - 3.2 Temps de vie
 - 3.3 Modèle proposé, controverse.
4. Conclusion

Introduction

Une source ECR produit des ions multichargés , qui sont les produits du transport des ions du plasma vers la zone d'extraction.

Pour relier les ions extraits aux ions du plasma il faut donc connaître le mécanisme responsable de ce transport ; à ce jour on ne dispose que de conjectures

Dans une ECR le transport revêt une importance toute particulière car, pour produire des ions très chargés, il est nécessaire de garder les ions pendant un temps suffisant pour qu'ils soient « épluchés » jusqu'à la charge souhaitée.

Ces considérations sur les ions s'appliquent également aux électrons. En effet :

- le plasma étant neutre, les fuites d'électrons et d'ions doivent être égales et il faut donc que le transport des électrons soit compatible avec celui des ions : les électrons doivent également rester suffisamment longtemps dans la décharge
- on ne dispose que d'assez peu de moyens de contrôle sur le transport ionique (toutefois on a quelques recours : dimension du plasma, température ionique contrôlée par le mélange de gaz...). En revanche c'est sur les électrons que l'on agit directement par l'intermédiaire de la puissance HF.

La compréhension du fonctionnement d'une ECR et son optimisation requiert donc la connaissance des phénomènes de transport des particules chargées.

Le transport des électrons.

Expériences.

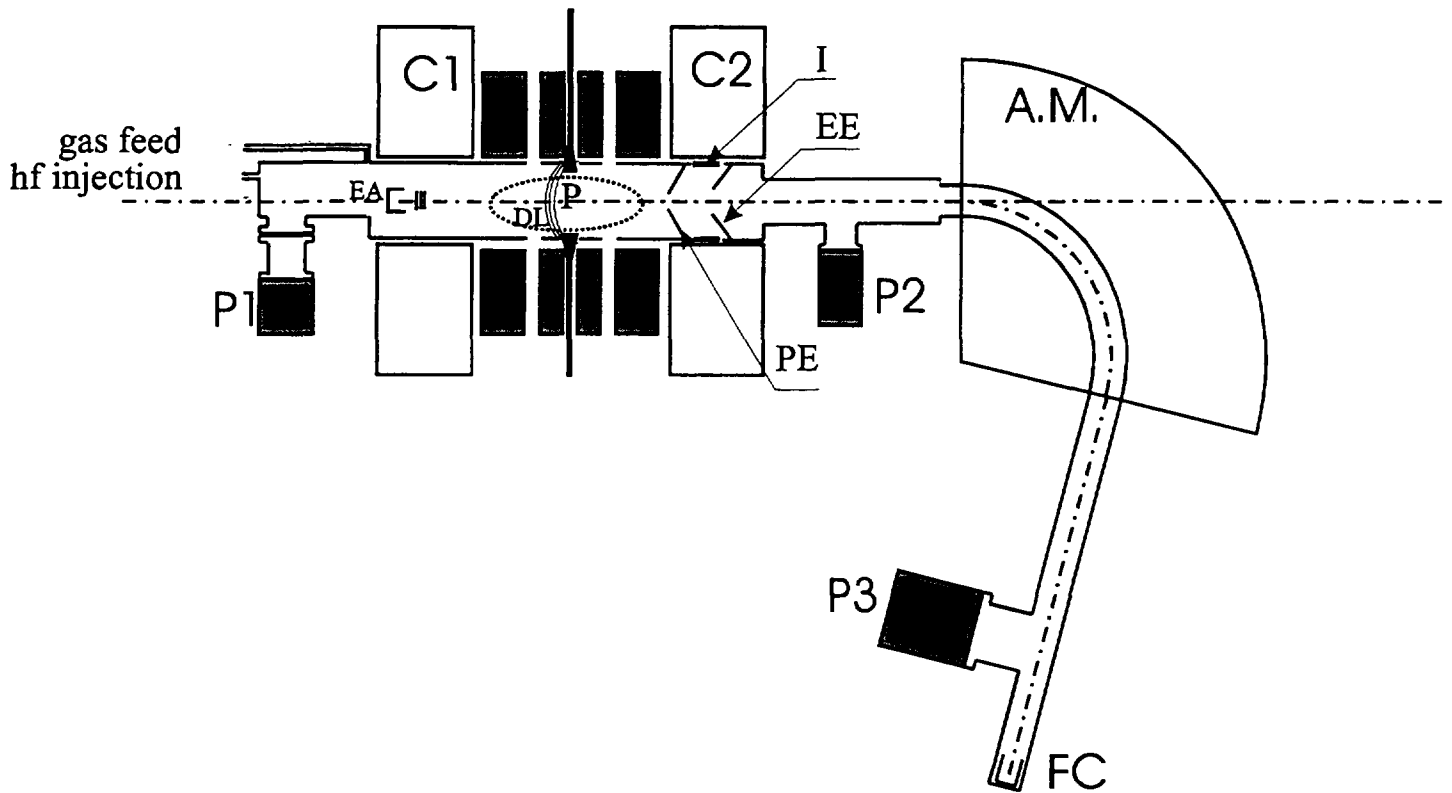


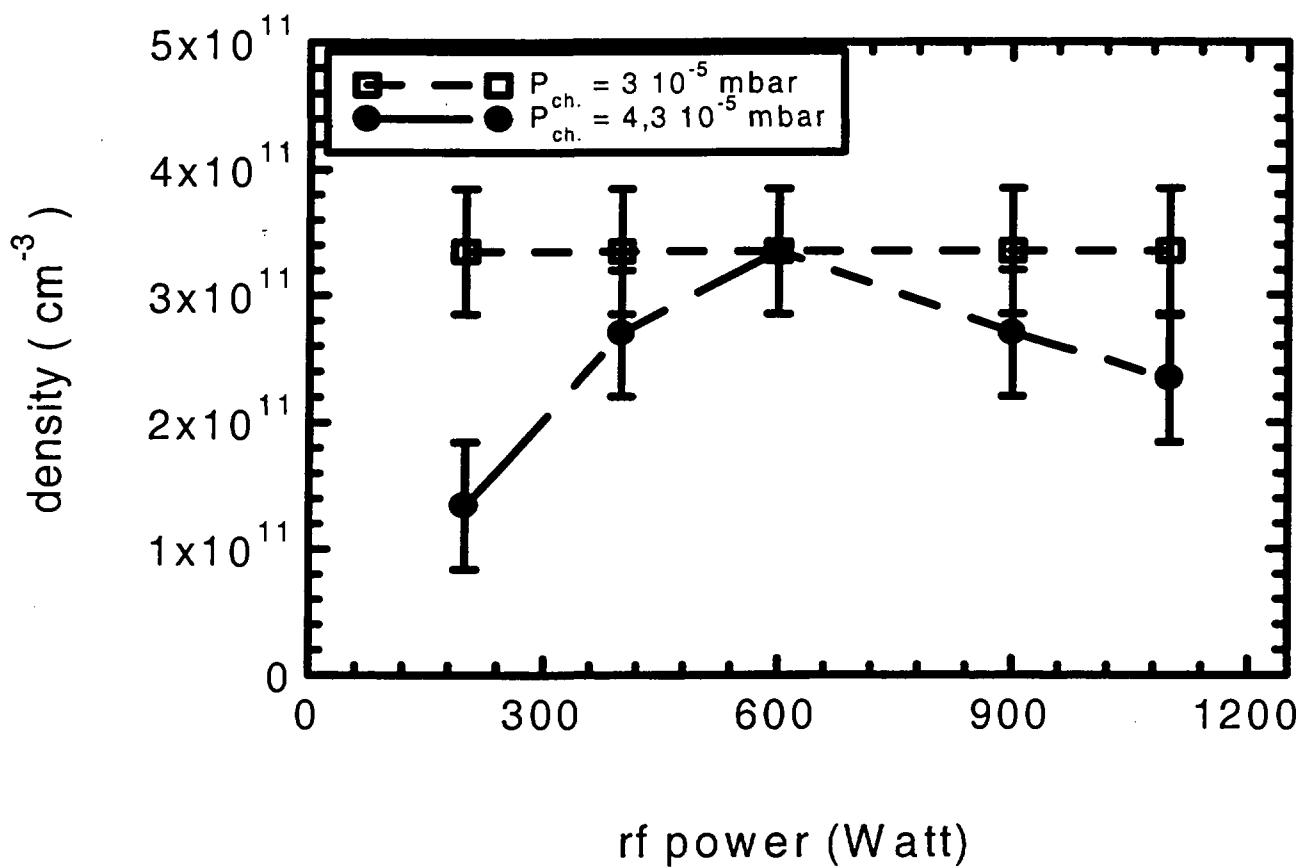
schéma de l'expérience : C1-C2 : bobines ; P1-P2-P3 : pompes ; FC : Cage de Faraday ; A.M. : aimant d'analyse ; P : plasma ; PE : électrode plasma ; EE : électrode d'extraction ; I : isolant ; EA : analyseur (électrons, ions) ; DL : boucle de diamagnétisme. L'interféromètre 63 GHz mesure la densité le long de la corde.

On a accès à:

- densité électronique
- courant électronique
- contenu énergétique
- potentiel plasma et courant électronique

Résultats :

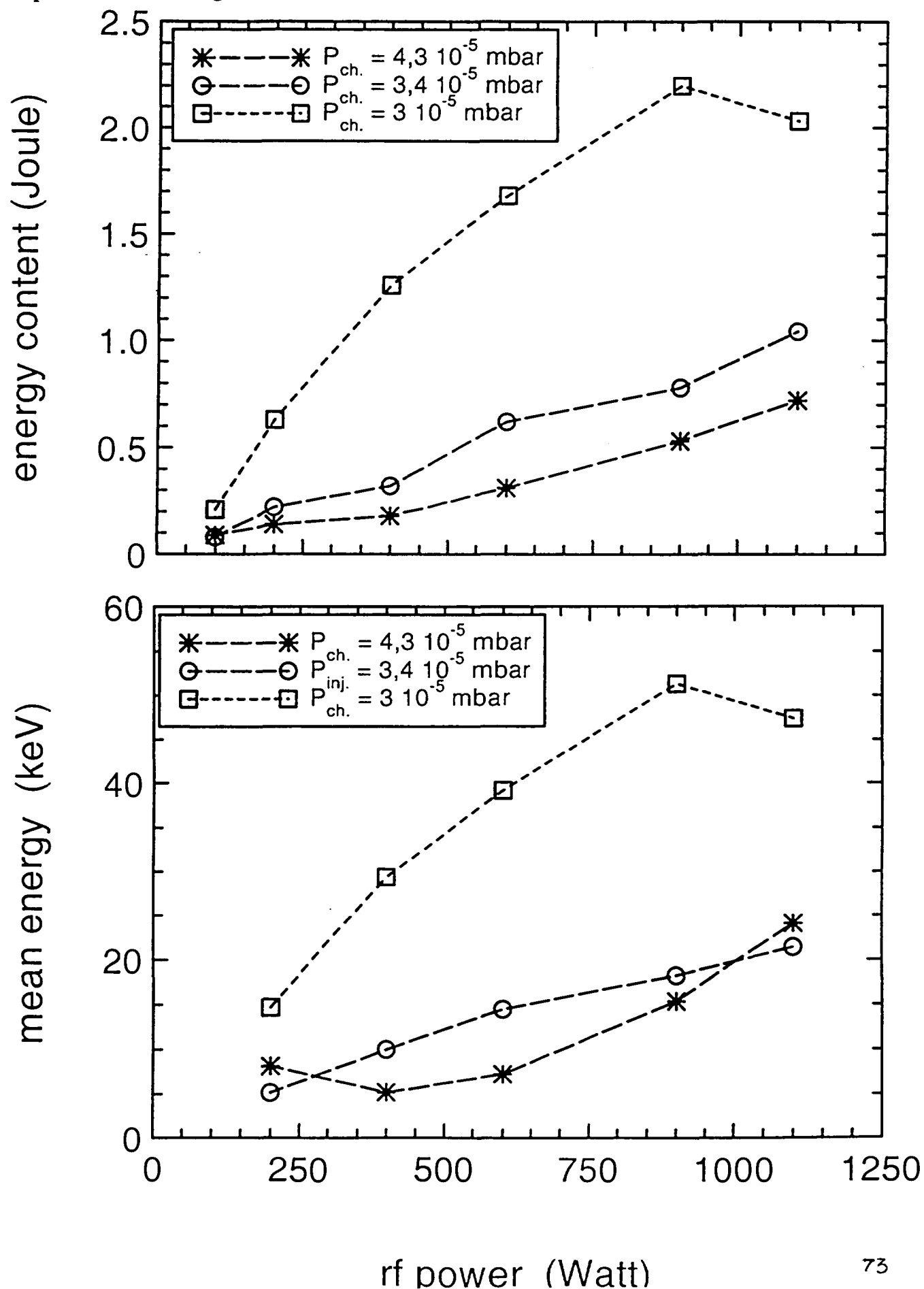
La densité électronique augmente rapidement avec la puissance et sature ensuite.



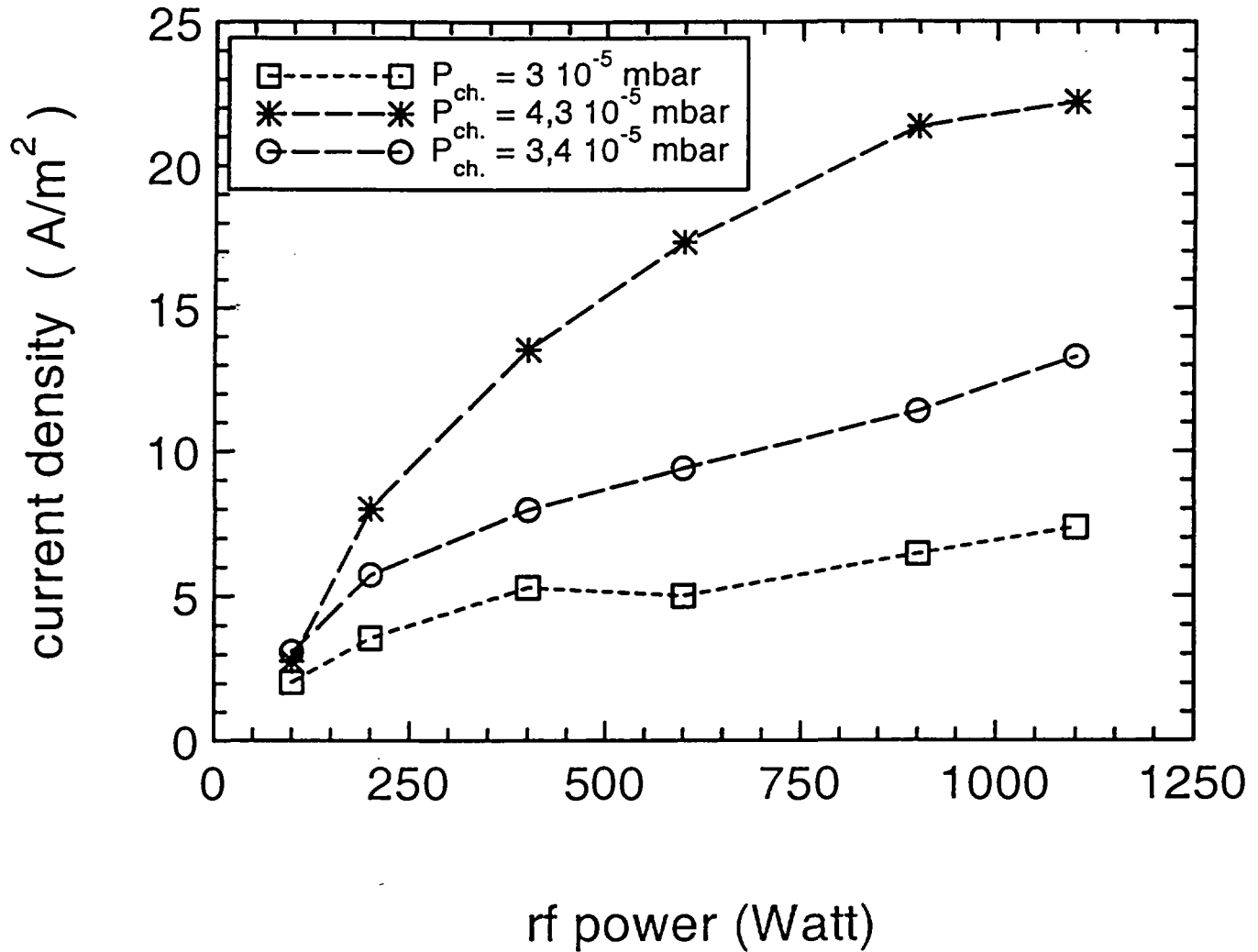
Les ions deux fois chargés sont produits préférentiellement dans le régime à fort contenu énergétique et faible pression :

Pressure (mbar)	hf power (W)	I(He ⁺) (eμA)	I(He ²⁺) (eμA)
3×10^{-5}	200	225	32
3×10^{-5}	500	244	84
$4,3 \times 10^{-5}$	200	310	21
$4,3 \times 10^{-5}$	500	310	70

Contenu énergétique (électronique) et énergie électronique moyenne à partir du diamagnétisme :



Le courant électronique augmente avec la puissance et la densité de gaz neutre.

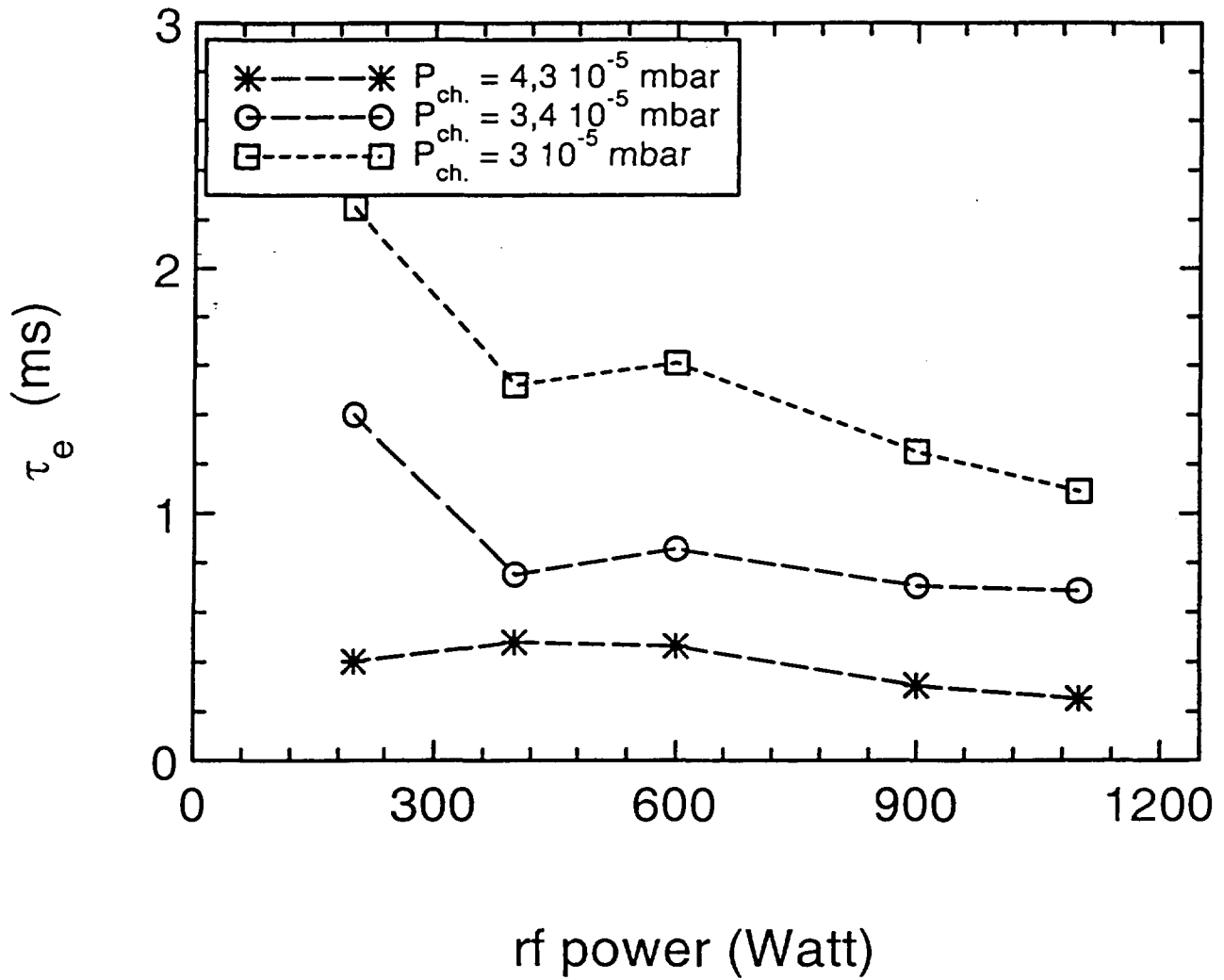


Le temps de vie des électrons, défini par :

$$\tau_e = \frac{esL n_e}{2 I_e}$$

diminue donc quand la puissance augmente et lorsque la pression de gaz neutre augmente.

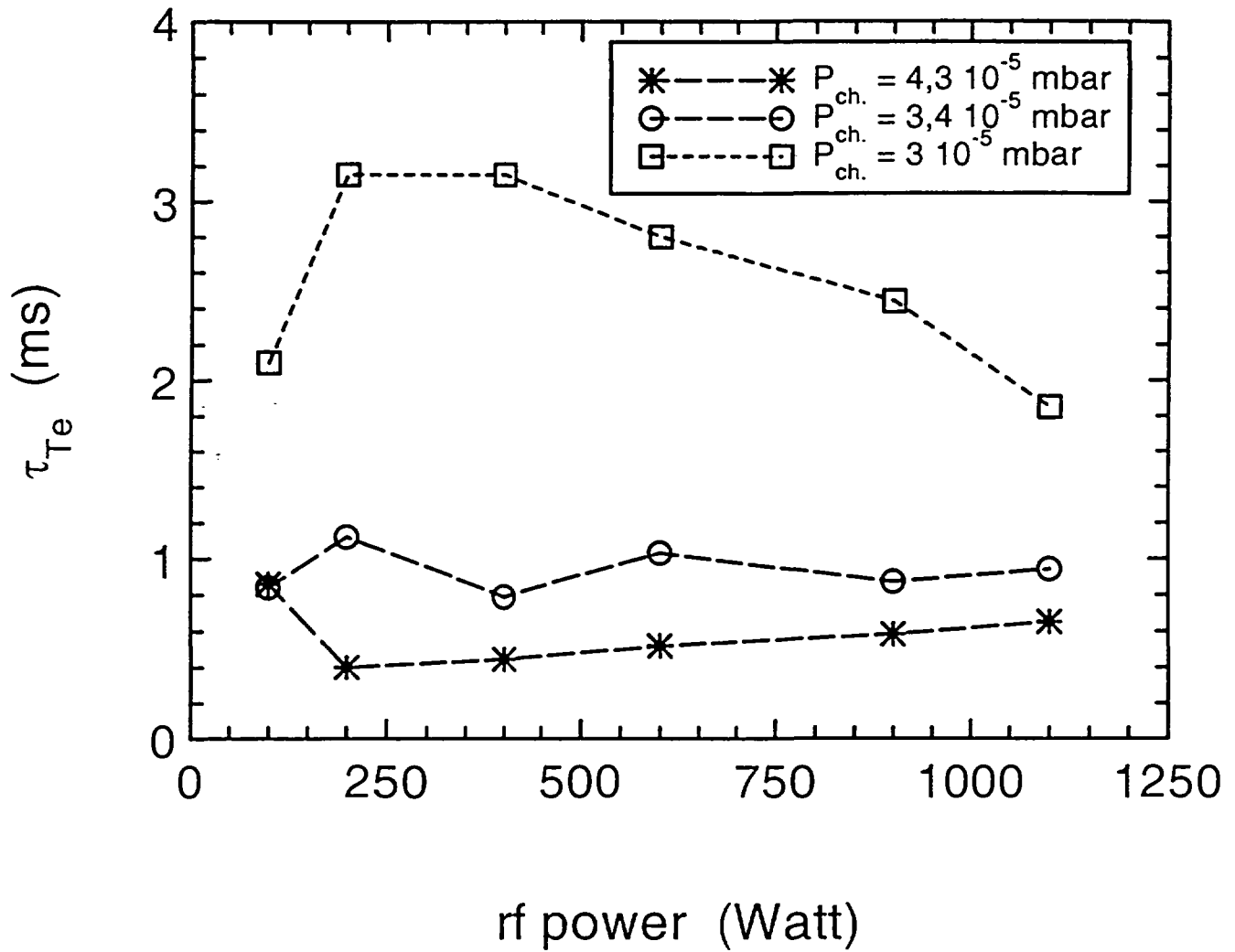
Temps de vie des électrons : τ_e



Le temps de vie de l'énergie électronique, τ_{Te} , a le même comportement et une valeur à peu près identique (quoiqu'un peu supérieure).

$$\tau_{Te} = \frac{W_e}{P_e}$$

Temps de vie de l'énergie des électrons, τ_{Te}



Si le processus de pertes était seulement les collisions, on s'attendrait à un temps de vie de l'énergie beaucoup plus grand que celui observé, car :

$$\frac{\tau_e}{\tau_{Te}} \approx \sqrt{\frac{V_{pl}}{T_e}}$$

pour un transport purement collisionnel.

Il existe donc un mécanisme de pertes beaucoup plus important que les seules collisions

Interprétation et modélisation.

Ce ne sont pas les collisions coulombiennes qui gouvernent le transport des électrons. En effet :

1. étant donné l'anisotropie très forte de la fonction de distribution électronique on devrait avoir un temps de vie de l'énergie beaucoup plus grand que celui des particules.

2. les pertes d'électrons par collisions les amenant dans le cône de pertes ne suffisent pas à expliquer la saturation de la densité et des performances des sources ECR.

C'est l'interaction HF elle-même qui limite les performances des sources :

$$m \frac{dv}{dt} = q (E + v \times B) \quad \text{et} \quad B = \frac{E}{V_\phi}$$

à la résonance cyclotron la vitesse de phase décroît fortement et l'interaction avec le champ magnétique devient dominante. On ne chauffe plus, le champ magnétique précipite les électrons dans le cône de pertes (phénomène diffusif dans l'espace des vitesses).

On peut modéliser les phénomènes par une équation de diffusion (FP):

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll} + \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{hf} + S$$

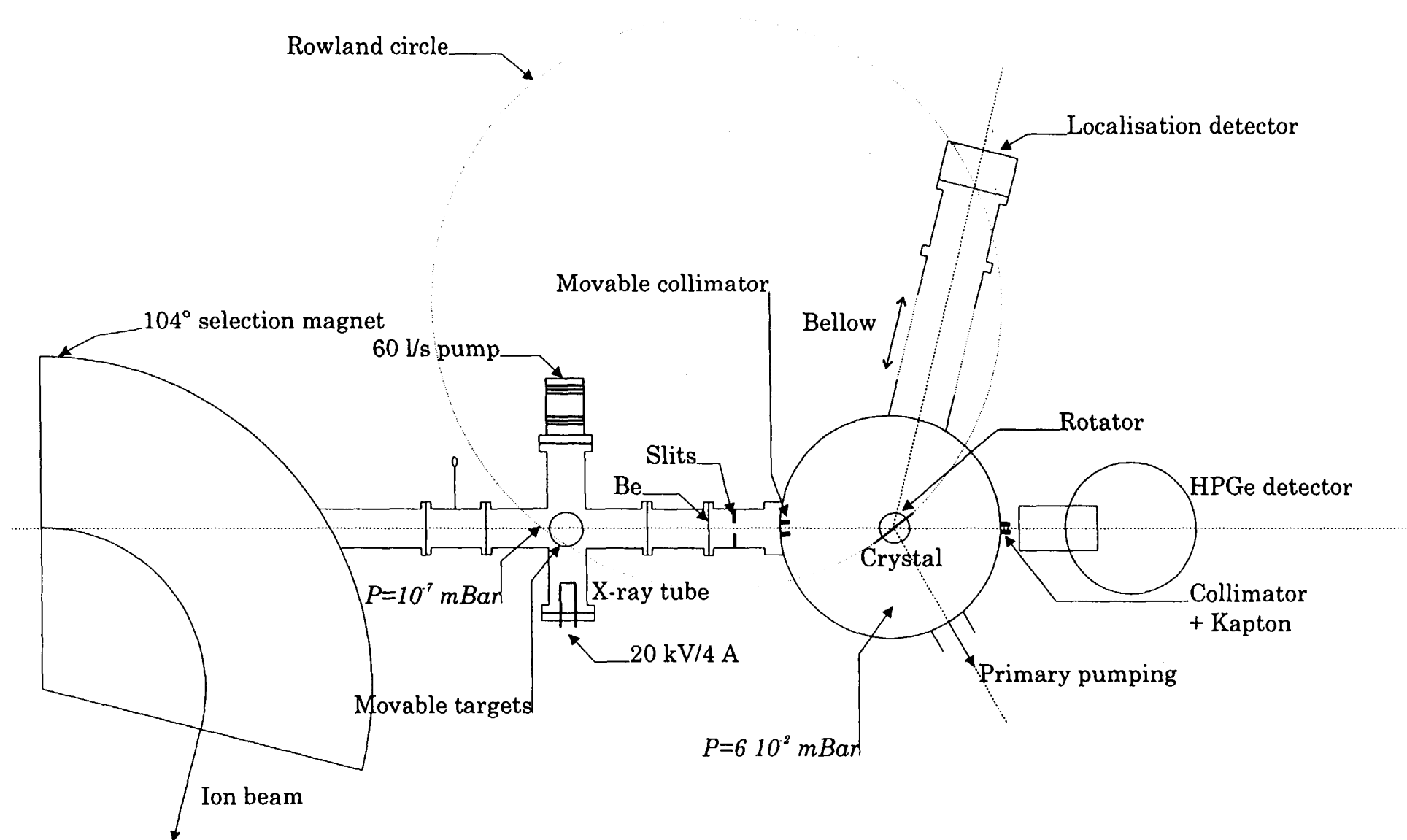
Une première modélisation (1D en vitesse, 0D en espace) a montré un accord qualitatif. Une modélisation 2D en vitesse a montré un accord quantitatif. Une loi d'échelle se déduit de l'étude :

$$(n_e T_e)_{max} \leq n_c m_e c^2, \quad n_c = \frac{\epsilon_0 m_e \omega^2}{e^2}$$

Transport des ions.

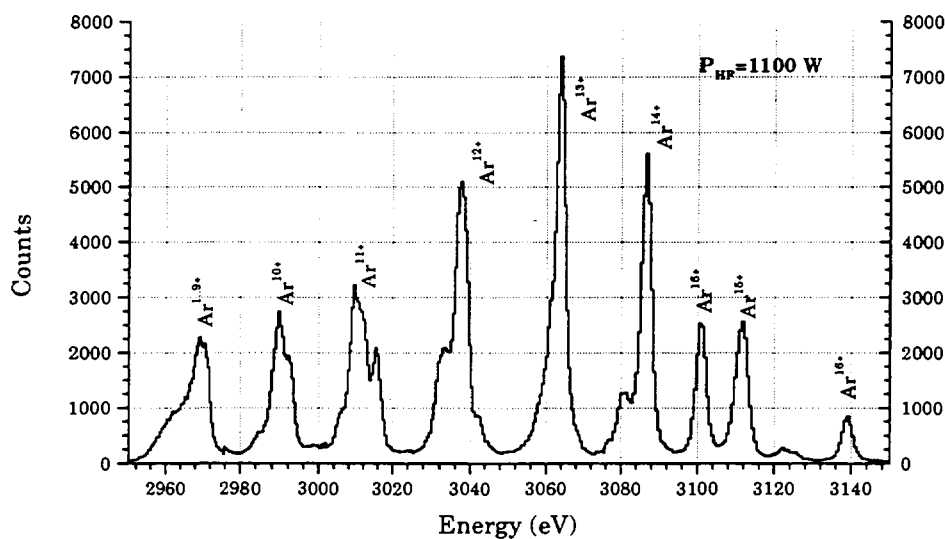
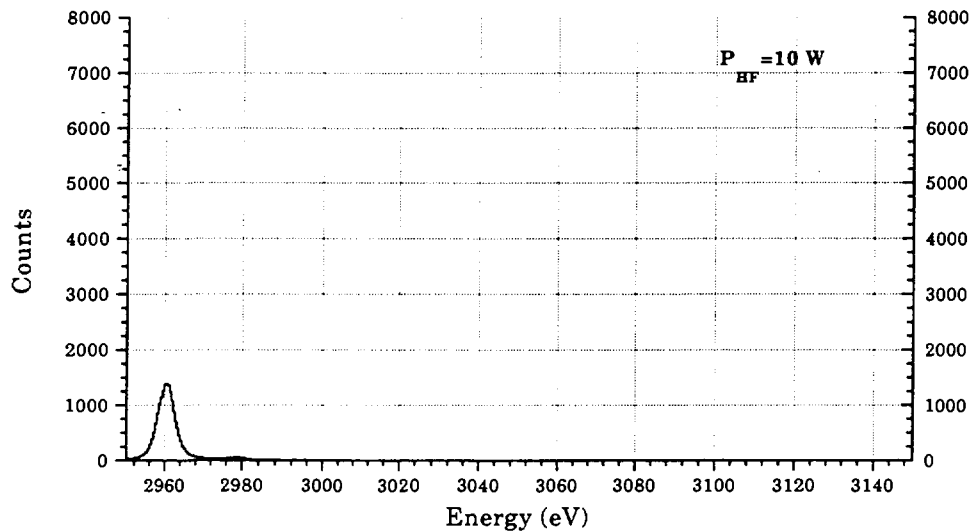
Expérience : mesure de la K_{α} de l'argon. Ici c'est la source Caprice qui a été utilisée (dans Quadrumafios cette raie n'est pas élargie).

Idée : la position de la raie K_{α} de l'argon varie avec la charge. Un spectro X à haute résolution permet d'identifier la raie émise par les différents ions et donc , par un modèle collisionnel radiatif simple, d'estimer les densités d'ions argon. Une comparaison avec les courants permet ensuite d'appréhender les temps de vie.

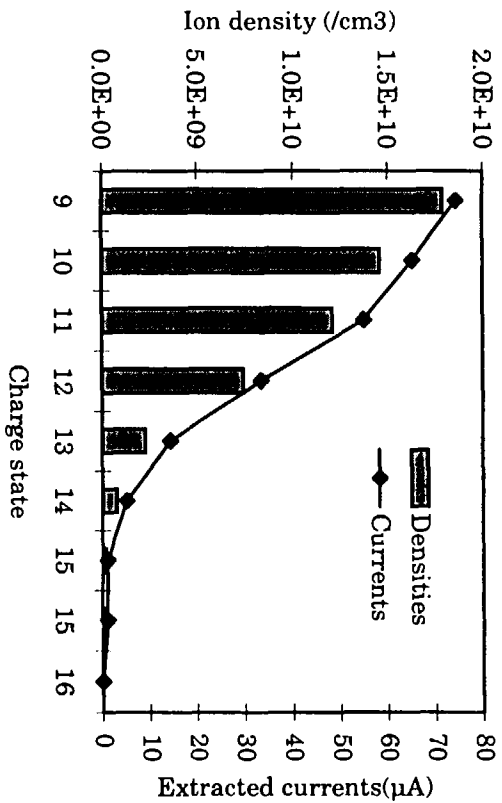
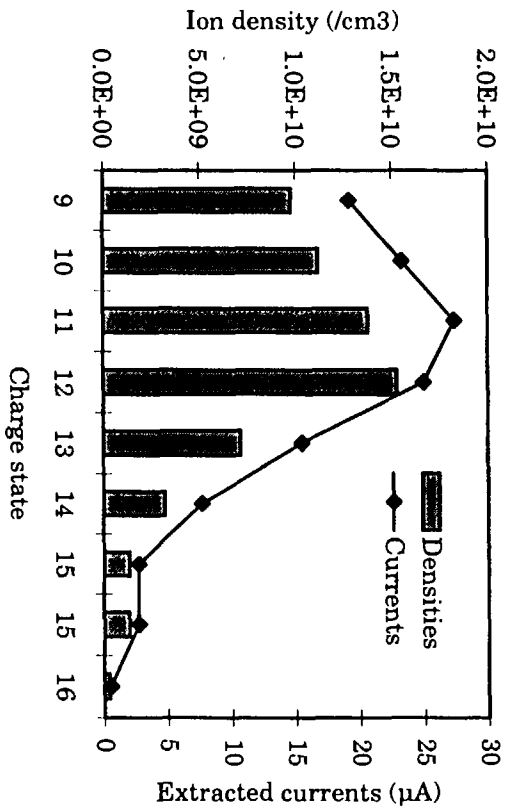


Mesure des raies : dès 10 watts on voit la K_{α} , signe que l'on a tout de suite des électrons très énergétiques ($> 3 \text{ keV}$).

Avec l'augmentation de puissance on voit apparaître les raies des ions très chargés (NB : les ions de 1 à 8 ne peuvent pas être distingués du neutre car le déplacement de la raie est trop faible).

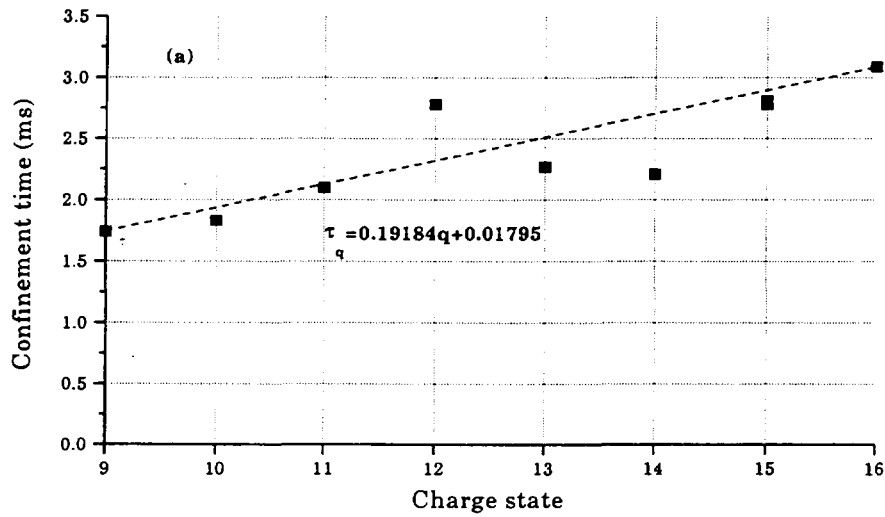


Par un modèle collisionnel radiatif on estime les densités, que l'on peut comparer aux courants extraits de la source :



Ici on a deux puissances : 1100 W et 400 W

Temps de vie des ions : $\tau_q = \kappa \frac{LS}{2} \frac{n_q q e}{I_q}$



On observe que le temps de vie augmente avec la charge, semble-t-il linéairement.

Interprétation, modélisation.

Le temps de vie des ions mesuré ici est tout-à-fait conforme aux autres mesures effectuées antérieurement (ordre de grandeur du temps de vie en régime multichargé : 1 ms environ).

On peut proposer le modèle suivant pour le confinement ionique : les ions, très collisionnels, diffusent dans l'espace réel et sont poussés hors de la décharge par le champ électrique ambipolaire ; il s'en déduit une loi du temps de vie :

$$\tau_q = 7.1 \cdot 10^{-20} a q \text{Ln}\Lambda \frac{\sum_j \sqrt{A_j} \sum_q n_q q^2}{T_i^{3/2} E}$$

On peut estimer que le champ électrique est très inférieur au rapport du potentiel plasma à la longueur de la source. On a déjà vu antérieurement que les ions sont froids ($T_i < 1$ eV) . Ce modèle de temps de vie est consistant avec les mesures et devra toutefois être confronté à un modèle, notamment vis à vis d'autres lois proposées précédemment:

- le puits de potentiel négatif $\Delta\Phi$ (qui serait créé par les électrons énergétiques),

$$\tau_q = \frac{Ra}{v_{T_i}} \exp\left(\frac{qe|\Delta\Phi|}{kT_i}\right)$$

- la diffusion collisionnelle des ions multichargés,
-

$$\tau_q = 7.1 \cdot 10^{-20} a^2 q^2 \text{Ln}\Lambda \frac{\sum_j \sqrt{A_j} \sum_q n_q q^2}{T_i^{5/2}}$$

Conclusion

La dynamique des électrons est contrôlée par la HF (chauffage par E, diffusion angulaire par B). Un rapport miroir élevé permet de limiter les pertes. L'important est la loi d'échelle : plus la fréquence augmente, plus on peut augmenter le contenu énergétique des électrons , et par conséquent les performances.

Les ions sont froids et collisionnels. Leur temps de vie croît avec la charge. Si cette croissance avec la charge est effectivement linéaire, leur transport est contrôlé par la diffusion spatiale dans le champ électrique ambipolaire. Un temps de vie correct requiert un plasma de grandes dimensions, et de faible température ionique.



Amélioration de l'émittance du faisceau extrait de la source SILHI

**R. Gobin, P.Y. Beauvais, D. Bogard, G. Bourdelle, L. Celona*,
G. Charruau, O. Delferrière, D. De Menezes, A. France, R. Ferdinand,
Y. Gauthier, F. Harrault, J.L. Jannin, J.M. Lagniel, P.A. Leroy, I. Yao**

**Commissariat à l'Energie Atomique
CEA – Saclay, DSM / DAPNIA / SEA 91 191 Gif sur Yvette**

*** (INFN / LNS – Catane – Italie)**

Introduction

La source SILHI est étudiée au CEA, dans le cadre beaucoup plus général des accélérateurs de puissance destinés à la production de flux intenses de neutrons. Elle est construite et optimisée dans le but d'injecter un faisceau de protons pouvant atteindre 100 mA dans le RFQ du projet IPHI [1] (Injecteur de Protons Haute Intensité, développé en collaboration avec le CNRS – IN2P3). L'énergie des ions à l'entrée du RFQ sera de 95 keV et l'émittance requise de 0.2π mm mrad. SILHI est une source d'ions de type ECR fonctionnant à $\omega_{HF} = 2.45$ GHz (résonance cyclotronique électronique pour un champ magnétique $B = 875$ Gauss).

La source et la ligne de transport permettant l'analyse du faisceau ont été décrites précédemment [2]. Dans cet exposé, nous insisterons plus particulièrement sur les expériences et les résultats obtenus au cours des derniers mois. Notamment la réduction de l'émittance en injectant des gaz lourds dans la ligne de transport reste à expliquer mais permettrait d'ores et déjà d'injecter le faisceau dans de bonnes conditions dans la suite de l'accélérateur. Nous présenterons aussi les premiers tests du rendement en protons en fonction de la position de la zone ECR dans la chambre plasma et les résultats concernant la fiabilité. Pour conclure, nous présenterons les futures expériences actuellement prévues.

Résultats des dernières mesures

1- Réduction de l'émittance

L'un de nos buts est de valider les codes de calcul en comparant les simulations et l'expérience. Nous pouvons faire ces comparaisons en ligne, avec le code Axcel pour l'extraction et le code MultiPart pour le transport. Les résultats obtenus il y a deux ans montraient une bonne concordance [3] mais le faisceau était trop grand à la sortie du système d'extraction et le rendement dans la ligne de transport chutait dès que l'intensité extraite dépassait 65 mA.

Une augmentation du champ électrique dans les deux gaps accélérateurs a permis de diminuer le diamètre du faisceau à l'extraction et donc d'accroître le rendement de transmission dans la ligne. Et là, les codes ont divergé par rapport à la réalité. La première idée a été : la compensation de charge d'espace due à l'ionisation du gaz résiduel est moins forte que précédemment. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons augmenté la pression dans la ligne de transport en y injectant de l'azote et ... l'émittance du faisceau s'est nettement améliorée.

Pour essayer de mieux comprendre cette diminution, nous avons renouvelé l'expérience en faisant des mesures systématiques avec différents gaz (H_2 , N_2 , Kr, Ar) à différentes pressions. Nous avons également changé la position de la vanne microfuite et fonctionné pour trois valeurs de solénoïde. La grande majorité des mesures a été effectuée à 120A (soit 1720 Gauss) et quelques unes l'ont été à 116 et 124A.

Précisons que toutes les mesures rapportées ici ont été faites avec un faisceau de 75 mA à 95 keV (88% de protons), extrait à travers un trou de 8 mm de diamètre. Le filtre de Wien placé

derrière l'échantillonneur (trou de 0.2 mm analysant le faisceau sur un diamètre) permet de ne mesurer que l'émittance des protons (dans le plan r-r').

Les principaux paramètres de fonctionnement ainsi que ceux qui ont permis d'extraire le maximum de faisceau avec un trou de 8 mm, sont reportés dans le tableau suivant

Parameters	Experiment	Status
Total beam current (mA)	75	105
Proton fraction (%)	88	88
Proton beam (mA)	66	92.4
Beam density (mA/cm ²)	148	208
Beam energy (keV)	95	95
Intermediate Electrode (kV)	56	47
Discharge RF Power (kW) 2.45 GHz	0.6	1.2
Beam emittance (π mm mrad)	0.3 --- 0.1	
Hydrogen mass flow (sccm)	1.7	≈ 1.6

Nous avons d'abord constaté que l'effet le plus important est observé en fonction de la pression (P1) dans la première partie de la ligne et non pas au niveau de la mesure d'émittance (P2). La jauge de penning P1 (calibrée Azote) est placée entre le tube accélérateur et le solénoïde. La pression de fonctionnement, sans injection de gaz, est égale à $1.8 \cdot 10^{-5}$ Torr pour P1 et à $1.2 \cdot 10^{-5}$ Torr pour P2.

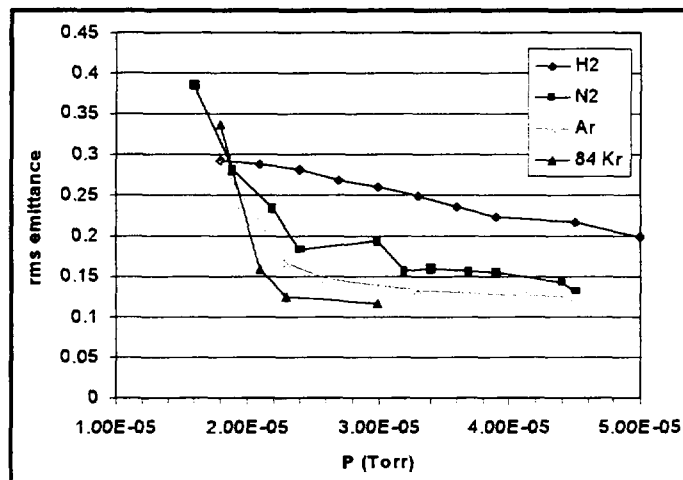


Fig.1: Emittances rms normalisées en fonction de P1

La figure 1 confirme une réduction importante de l'émittance avec l'adjonction de gaz dans la ligne. Celle-ci dépend de la nature du gaz et de la pression.

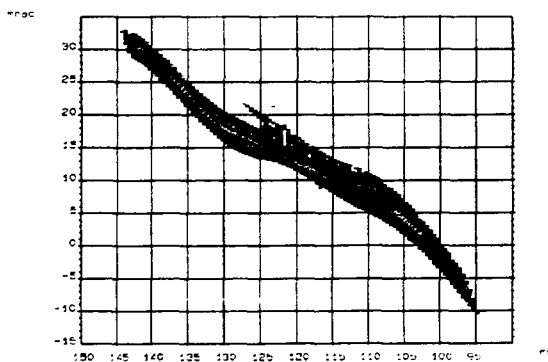


Fig 2a : $\epsilon_{rms\ norm} = 0.33 \pi$ mm mrad
Sans injection de Kr ($p_1 = 1.8 \cdot 10^{-5}$ Torr)

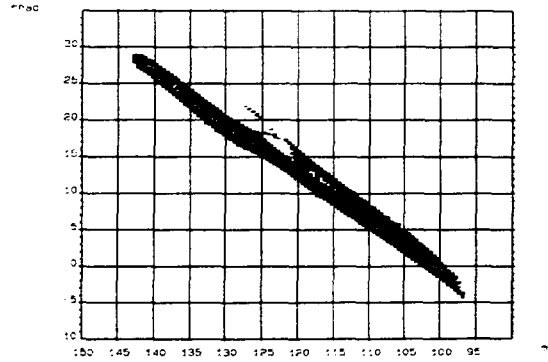


Fig 2b : $\epsilon_{rms\ norm} = 0.11 \pi$ mm mrad
Avec injection de Kr ($p_1 = 3.5 \cdot 10^{-5}$ Torr)

Sur les figures 2a et 2b, nous constatons que la figure d'émission se redresse et que le diamètre du faisceau diminue. Cette évolution est aussi constatée au cours de la mesure où l'on remarque qu'en présence de gaz, chaque beamlet est plus étroit et plus intense.

Le même comportement a été observé sur les mesures effectuées (avec et sans injection d'Ar) pour les deux autres valeurs de champ magnétique. Par contre, sans injection de gaz, la valeur de l'émission varie en fonction du champ magnétique.

Une mesure de l'intensité en fonction de l'addition des différents gaz a montré que les pertes par neutralisation (recombinaison) sont limitées à 5% pour un gain important de l'émission en injectant du Krypton ou de l'Ar et de près de 15% avec l'Azote ou l'Hydrogène.

Ces observations entraînent un certain nombre d'interrogations : est-ce un effet de cooling, une modification de la compensation de charge d'espace, un changement des conditions plasma avec un apport de quelques ppm d'atomes lourds dans la source ou autre ?

2- Proportion de proton

Lors d'une visite à Saclay, C. Jacquot du DRFC/CEA-CADARACHE a dit que SILHI paraissait être un bon candidat pour la production d'ions H^+ car elle fournit un bon faisceau d'ions positifs avec un fort rendement en protons. Pour mieux comprendre ce rendement, nous avons mesuré l'intensité totale extraite et le rendement, en travaillant avec une seule zone ECR et en la déplaçant dans la chambre plasma (la seconde zone ECR se situant au-delà du trou d'extraction). Nous avons gardé une extraction à 95 kV avec l'électrode intermédiaire à 39 kV. Les seuls paramètres que nous ayons changés en plus du courant dans les bobines de la source sont la pression pour minimiser le bruit du faisceau et la puissance RF pour augmenter l'intensité extraite.

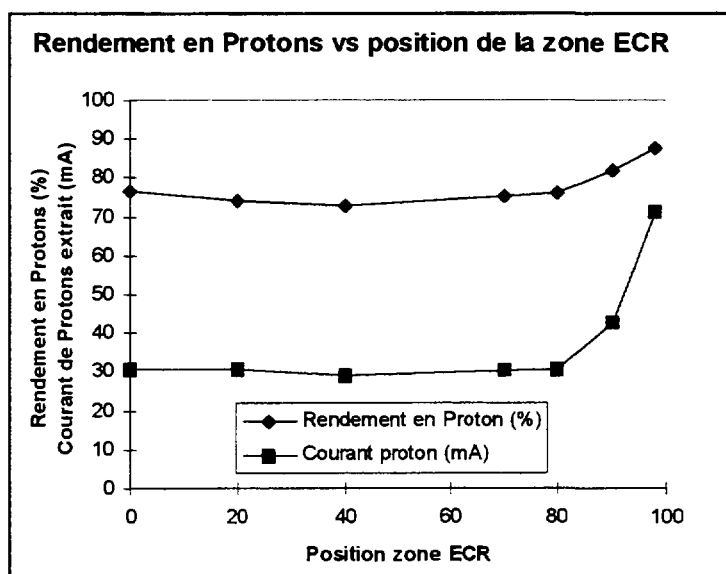


Fig. 3: Rendement en Protons en fonction de la position de la zone ECR dans la chambre plasma

La figure 3 montre que l'influence de la position de la zone ECR est très pointue pour le rendement en protons mais encore plus sur l'intensité du faisceau extrait. En effet, l'intensité diminue fortement pour un déplacement de 8 mm alors que la fraction de protons ne baisse que de 5.7 %. Nous avons noté qu'en rapprochant la zone ECR de l'électrode plasma, le rendement en protons remonte légèrement par contre l'intensité du faisceau extrait devient très instable.

Nous avons aussi produit un faisceau de 100 mA (rendement de protons = 80 %) avec seulement 350 W de puissance RF injectée en ajustant le courant dans les bobines pour obtenir une zone ECR à chaque extrémité de la chambre plasma.

4- Test de fiabilité

Avec un trou de 10 mm de diamètre, un faisceau total de 100 mA à 80 keV a été extrait pendant une semaine de fonctionnement continu (103 heures) avec une disponibilité de 95 % (Fig. 4).

Ce test a mis en évidence une période de formation au cours des premières 24 heures et un temps moyen entre deux arrêts de 5 h 33 mn pour les quatre derniers jours. Le temps moyen d'intervention a été de 4 mn 44 s si on excepte les deux pannes longue durée dues à des coupures d'air comprimé. Des progrès sur l'automatisation des redémarrages et sur la compatibilité électromagnétique ont permis de minimiser le nombre de claquages et le temps d'intervention.

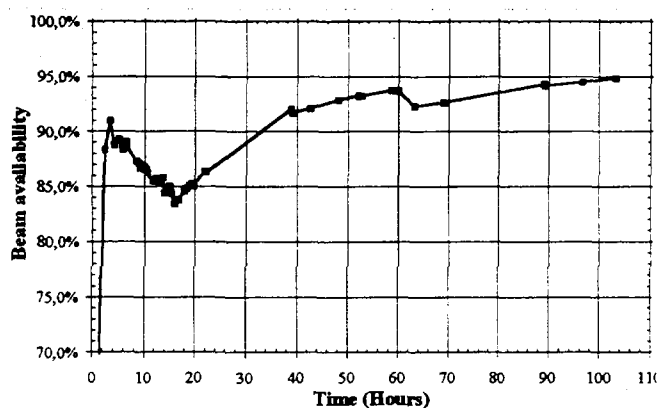


Fig. 4: Courbe de disponibilité en fonction du temps ($I = 100$ mA à 80 keV)

Suite à ce test de longévité nous n'avons observé aucune dégradation tant à l'intérieur de la source qu'au niveau du tube accélérateur.

Conclusion

Les performances obtenues depuis le démarrage de la source (juillet 96) sont au plus haut niveau international et très proches des conditions requises pour injecter dans un accélérateur fort courant. Nous essayons d'optimiser un nouveau système d'extraction pour minimiser la divergence du faisceau dès la sortie de la source. Une disponibilité de près de 98 % avec un faisceau total de plus de 110 mA et un rendement supérieur à 90% doivent être atteints : c'est un objectif prioritaire. Le développement d'une mesure d'émittance non interceptive basée sur la méthode des trois gradients et l'analyse des profils issus d'une caméra CCD [4] est prometteur et sera poursuivi.

Une ligne d'analyse avec deux solénoïdes et une nouvelle boîte de diagnostics sont actuellement installées pour caractériser le faisceau dans les conditions d'entrée du RFQ.

Une mesure de la compensation de charge d'espace avec un analyseur à quatre grilles développé à Los Alamos permettra de répondre en partie sur le phénomène de réduction de l'émittance. Des études sur la "décompensation" en collaboration avec l'université de Francfort seront également entreprises dans les prochaines semaines.

Pour des projets comme Trispal ou le démonstrateur des réacteurs hybrides qui demandent un faisceau de protons avec une intensité réduite, SILHI peut déjà répondre à l'ensemble des caractéristiques requises.

Après le déménagement complet de l'installation au début de l'année 1998, des performances identiques ont été obtenues en moins de trois semaines ; nous serions donc capables de construire et démarrer une nouvelle source en cas de besoin.

Références

- [1]- R. Ferdinand et P. Mattéi : "La dynamique du RFQ du projet IPHI", rapport interne DSM/DAPNIA/SEA 98/71
- [2]- R. Gobin et al. : "Développement d'une source d'ions légers haute intensité au CEA Saclay", Journées sources d'ions Saclay 1997
- [3]- R. Gobin et al. : "Last results of the CW High-Intensity Light Ion Source SILHI at CEA-Saclay", I C I S .97, Taormina, Italie [R.S.I.- Vol 69, n°2, Part II, 1998, (1009-1011)]
- [4]- R. Ferdinand et al. : "Non Interceptive Emittance Measurement of a High Intensity Beam at Low Energy", Linac Conference 98, Chicago, USA

NOMS	LABOS	RUE	CODE POSTAL-VILLE	E-MAIL	SUJET
AUBERT Jean	IEF	Bât 220 - Centre d'Orsay	91405 ORSAY CEDEX	Jean.Aubert@iet.u-psud.fr	Source microonde multiantenne pour le traitement des matériaux (présenté par P. COSTE)
BACAL Marthe	Lab. PMI, Ecole Polytechnique		91128 PALAISEAU	bacal@lpmi.polytechnique.fr	Effet de l'adjonction de césium et de xénon dans les sources d'ions négatifs d'hydrogène
BAJEAT Olivier	IPN		91406 ORSAY CEDEX		
BARON Eric	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	baron@ganil.fr	
BARUE Christophe	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	barué@ganil.fr	
BIETH Claude	PANTECHNIK	Rue A. Kastler	14000 CAEN	pantechnik@compuserve.fr	Développements et applications de sources ECR
BOULIN Yves	CEA DAM DASE/RCE/MSG	BP 12	91680 BRUYERES LE CHATEL		
BOULY Jean Luc	ISN	53 avenue des Martyrs	38026 GRENOBLE CEDEX		
BRUANDET Jean-François	ISN	53 Av des martyrs	38026 GRENOBLE CEDEX	Bruandet@isn.in2p3.fr	
CASSIMI Amine	CIRIL	Rue Bloch BP 5133	14070 CAEN CEDEX 05	cassimi@ganil.fr	
CHARLES Pierre	Lab. DIAM - Univ. P et M Curie	T12, case 75	75252 PARIS CEDEX 05	charles@lpan.jussieu.fr	
CHAUVIN Nicolas	ISN	53 avenue des Martyrs	38026 GRENOBLE CEDEX	nicolaschauvin@isnin2p3.fr	Expérience I+ → n+ (présenté par T. LAMY)
CHESNEL Jean Yves	CIRIL	Rue Bloch BP 5133	14070 CAEN CEDEX 05	chesnelspalp255.ismra.fr	
CHEVAL Muriel	IRes/IN2P3	BP 28	67037 STRASBOURG CEDEX		
COSTE Philippe	IEF	Bât 220 - Centre d'Orsay	91405 ORSAY CEDEX	Philippe.Coste@iet.u-psud.fr	Source microonde multiantenne pour le traitement des matériaux
COTTEREAU Evelyne	IPN	Bât 106	91406 ORSAY CAMPUS	cottreau@ipno.in2p3.fr	
CURDY Jean-Claude	ISN	53 avenue des Martyrs	38026 GRENOBLE CEDEX		
DANTAL Yann	PMI, Ecole Polytechnique		91128 PALAISEAU	dantal@pmi.polytechnique.fr	Les derniers résultats expérimentaux sur les propulseurs à effet Hall
DELFERRIERE Olivier	DAPNIA/SEA B144	CE SACLAY	91191 Gif/YVETTE CEDEX	odelferriere@cea.fr	
DELLA-NEGRA Serge	IPN		91406 ORSAY CEDEX	dellaney@ipno.in2p3.fr	Production d'ions polyatomiques

NOMS	LABOS	RUE	CODE POSTAL-VILLE	E-MAIL	SUJET
DEPAW Joël	IPN		91406 ORSAY CEDEX		
DJOUADI Abdou	ENSAM		71250 CLUNY	djouadi@cluny.ensam.fr	Dépôt de nitrures sous bombardement ionique
DUPUIS Michel	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	dupuis@ganil.fr	
FERME Jacques			14000 CAEN		
FLAMBARD Jean-Luc	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	flambard@ganil.fr	
FOUAN Jérôme	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX	fouan@ganil.fr	
FREMONT François	CIRIL-ISMRA	6 Bd du Mal Juin	14050 CAEN CEDEX	fremont&spalp255.ismra.fr	Utilisation de la source « SUPERSHYPIE » pour deux études de collisions ion-atome et ion-molécule à basse énergie (présenté par D. Lecler)
FUSELIER Cristina	IEF	Bât 220 - Centre d'Orsay	91405 ORSAY CEDEX		
GAUBERT Gabriel	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	gaubert@ganil.fr	
GIRARD Alain	DRFMC/SI2A	CEA Grenoble - 17 rue des martyrs	38054 GRENOBLE CEDEX 9	agirard@cea.fr	Transport des particules chargées dans une source ECR, expériences, théorie
GOBIN Raphaël	DSM/DAPNIA/SEAC	CE/SACLAY	91191 GIF/YVETTE CEDEX	rgobin@cea.fr	Amélioration de l'émittance du faisceau extrait de la source
GUERREAU Daniel	GANIL	BP 5027 14076	14076 CAEN CEDEX 5	guereau@ganil.fr	
HITZ Denis	CEA/Grenoble. Dpt de la Rech	SI2A 17 rue des Martyrs	38054 Grenoble Cedex	dhitz@cea.fr	Expériences et perspectives d'une source supraconductrice
HUGUET Yves	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	huguet@ganil.fr	
HUSSON Xavier	CIRIL-ISMRA	6 Bd du Mal Juin	14050 CAEN CEDEX	husson@spalp255.ismra.fr	Utilisation de la source « SUPERSHYPIE » pour deux études de collisions ion-atome et ion-molécule à basse énergie (présenté par D. Lecler)
JACOB Vincent	CEA-DAM BIII DPTA/SP2A	BP12	91680 BRUYERES LE CHATEL	jacof@bruyeres.cea.fr	
JACQUET Emmanuelle	CIRIL-ISMRA	6 Bd du Mal Juin	14050 CAEN CEDEX	jacquet@spalp255.ismra.fr	Utilisation de la source « SUPERSHYPIE » pour deux études de collisions ion-atome et ion-molécule à basse énergie (présenté par D. Lecler)
JACQUOT Claude	DRFC/SCCP	CE Cadarache	13108 ST PAUL LES DURANCI		Etat des recherches sur les sources d'ions négatifs sur le faisceau au niveau mondial

NOMS	LABOS	RUE	CODE POSTAL-VILLE	E-MAIL	SUJET
JARDIN Pascal	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	jardin@ganil.fr	Les nouvelles sources à GANIL
KANTAS Said	PANTECHNIK	Rue A. Kasler	14000 CAEN		Développements et applications de sources ECR (présenté par C. BIETH)
KHEMLICHE Hocine	LCAM	Bât 351, Univ. Paris Sud	91405 ORSAY CEDEX	Khemlich@lcam.u-p-sud.fr	
KUCAL Hélène	CIRIL-ISMRA	6 Bd du Mal Juin	14050 CAEN CEDEX	hkucal@spalp255.ismra.fr	
LAMOUREUX Michèle	DIAM Pet M Curie	Case 75, 4 Pl. Jussieu	75252 PARIS CEDEX 05	mla@cer.jussieu.fr	
LAMY Thierry	ISN-SSI	53 Av des martyrs	38026 GRENOBLE CEDEX	lamy@isn.in2p3.fr	Expérience 1+ → n+
LANDRÉ Frédérique	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	landre@ganil.fr	Production d'ions radioactifs à SPIRAL
LECLER Daniel	CIRIL-ISMRA	6 Bd du Mal Juin	14050 CAEN CEDEX	lecler@spalp255.ismra.fr	Utilisation de la source « SUPERSHYPIE » pour deux études de collisions ion-atome et ion-molécule à basse énergie
LEHERISSIER Patrick	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	leherissier@ganil.fr	Les sources de faisceaux primaires à GANIL
LEMAGNEN Frédéric	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	Lemagnen@ganil.fr	
LEMAIRE Jean-Louis	DIF/DPTA/SP2A	BP12	91680 BRUYERES LE CHATEL	jlemaire@bruyeres.cea.fr	Interface plasma-faisceau dans les sources d'ions : résultats de simulations numériques
LEROY Pierre-Alain	DSM/DAPNIA/SEA	CE SACLAY	91191 GIF/YVETTE	paleroy@cea.fr	
LEROY Renan	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX	leroy@ganil.fr	
LIEUVIN Marcel	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	lieuvin@ganil.fr	
LOYER François	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	loyer@ganil.fr	
MAUNOURY Laurent	DPTA/SPN	CEA BP 12	91680 BRUYERES LE CHATEL	maunoury@bruyeres.cea.fr	
MELIN Gérard	CEA Grenoble	Dpt. de > recherche Fondamentale sur la matière condensée - S12A	38054 GRENOBLE CEDEX	gmelin@cea.fr	
MEUNIER Robert	CSNSM	Bât 104-108 Campus	91405 ORSAY CEDEX	meunier@csnsm.in2p3.fr	Projet de source d'ions sélective en ligne pour produits de fission
MOSCATELLO Marie-Hélène	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	moscatello@ganil.fr	
MOUFFRON Jean Pierre	IPN		91406 ORSAY CEDEX		

NOMS	LABOS	RUE	CODE POSTAL-VILLE	E-MAIL	SUJET
PACQUET Jean-Yves	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	pacquet@ganil.fr	
RATAUD Jean Paul	GANIL	BO 5027	14076 CAEN CEDEX 5	rataud@ganil.fr	
REBMEISTER ROBERT	IRES, Service des Accélérateurs	23 rue du Loess	67037 STRASBOURG CEDEX	robert.rebmeister@ires.in2p3.fr	
SAINT LAURENT Marie-Gen	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	mgstlaurent@ganil.fr	
SCHWEBEL Christian	IEF	Bât 220 - Centre d'Orsay	91405 ORSAY CEDEX	Christian.Schwebel@iet.u-psud.fr	Source microonde multiantenne pour le traitement des matériaux (présenté par P. COSTE)
SORTAIS Pascal	ISN	53 av. des martyrs	38076 GRENOBLE CEDEX	sortais@isnhp3.in2p3.fr	Expériences et perspectives d'une source supraconductrice (présenté par D. HITZ)
TIREL Olivier	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	tirel@ganil.fr	
VILLARI Antonio	GANIL	BP 5027	14076 CAEN CEDEX 5	villari@ganil.fr	